

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

KATEDRA TELEKOMUNIKAČNEJ TECHNIKY

VLIV RŮZNÝCH SPOJŮ OPTICKÝCH VLÁKEN NA
MĚŘENÍ POMOCÍ DTS SYSTÉMU

INFLUENCE OF DIFFERENT INTERCONNECTING
ELEMENTS FOR OPTICAL FIBERS TO THE
MEASUREMENTS USING DTS SYSTEM

Zadání bakalářské práce

Student:

Jozef Bugáň

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv různých spojů optických vláken na měření pomocí DTS systému.
Influence of Different Interconnecting Elements for Optical Fibers to the
Measurements using DTS System.

Zásady pro vypracování:

1. Popis rozptylu světla.
2. Popis nástrojů pro spojování optických vláken.
3. Výběr vhodných optických spojů a proměření jejich vlastností při použití DTS systému.

Seznam doporučené odborné literatury:

AGRAWAL, Govind P.: Nonlinear Fiber Optics, The Institute of Optics - University of Rochester, Academic Press, 1995. ISBN 0-12-045143-3.

DADO, M., TUREK, I., ŠTELINA, J., BITTERE, L., TUREK, S., GROLMUS, E., STIBOR, P.: Kapitoly z optiky pre technikov, Žilinská univerzita, Žilina, 1998. ISBN 80-7100-390-5


DOLEČEK, J.: Moderní učebnice elektroniky 3.díl - Optoelektronika a optoelektronické prvky, Ben, Praha, 2005. ISBN 80-7300-184-5

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Jaroš**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.



.....
Jozef Bugáň
28. apríla 2014

Pod'akovanie

Ďakujem môjmu vedúcemu práce Ing. Jakubovi Jarošovi za odbornú pomoc a usmernenie pri písaní tejto bakalárskej práce. Ďalej ďakujem za jeho pomoc pri meraní praktickej časti a odovzdanie vzácných skúseností, ktoré meranie učinili presnejším a efektívnejším.

Abstrakt

Problematikou bakalárskej práce je zisťovanie vplyvu optických spojov na meranie Brillouinovej frekvencie s použitím DTS systému. Pomocou Brillouinovej frekvencie sa dá dopočítať teplota prostredia pozdĺž optického vlákna. Meraním sa testuje, či rôzne optické spoje majú nejaký vplyv na Brillouinovú frekvenciu v oblastiach optického vlákna za konkrétnym optickým spojom v porovnaní s oblasťami optického vlákna pred spojom. Skúmané spojky sú vybrané na základe rozšírenosti v priemysle a tiež pre svoje vlastnosti prenášania optického signálu. Dosiahnuté výsledky sú spracované formou grafov popisujúcich jednotlivé fázy merania spojky a následne grafickým porovnaním spriemerovaných výsledkov jednotlivých spojov. Zdrojové namerané hodnoty vygenerované DTS systémom sú súčasťou príloh tejto bakalárskej práce.

Kľúčové slová

DTS, Brillouinová frekvencia, optické spojky, spájanie optických vlákien, nástroje spájania optických vlákien

Abstract

Issue of the bachelor thesis is detection the impact of optical splices for measuring Brillouin frequency with using the DTS system. Using Brillouin frequency is possible to calculate temperature along optical fiber. Measure is testing, if different optical splices have some impact on Brillouin frequency in areas in front of optical splice relative to areas behind optical splice. Researched couplings are selected on basis prevalence in the industry and also for their transmission characteristics of the optical signal. Achieved results are processed in the form of graphs describing various measurement phases of connector and then a graphic comparing the averaged results of all individual optical splices. Source DTS readings generated by the system are included in the annexes of this thesis.

Keywords

DTS, Brillouin frequency, optical splicers, splicing optical fibers, instruments for splicing optical fiber

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
APC	Angled Physical Contact	Uhlový fyzický kontakt
BOTDA	Brillouin Optical Time Domain Analyser	Brillouinový optický analyzér v časovej oblasti
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometer	Brillouinov optický reflektometer v časovej oblasti
DTS	Distributed Temperature System	Distribúovaný teplotný systém
IPA	Isopropyl Alcohol	Isopropyl Alkohol
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry	Optická reflektometria vo frekvenčnej oblasti
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	Optická reflektometria v časovej oblasti
PC	Physical Contact	Fyzický kontakt
SBS	Stimulated Brillouin scattering	Stimulovaný Brillouinov rozptyl
SMF	Single Mode Fiber	Jednovidové optické vlákno

Obsah

Obsah	9
1 Úvod	11
2 Rozptyl svetla	12
2.1 Rayleighov rozptyl	12
2.2 Brillouinov rozptyl	13
2.2.1 Stimulovaný Brillouinov rozptyl	13
2.2.2 Brillouinov frekvenčný posun	14
2.3 Ramanov rozptyl	14
2.4 Špecifikácia rozptylov	15
3 Systém DTS	16
3.1 História	16
3.2 Metóda OTDR	16
3.3 Popis technológie DTS	17
3.3.1 Rayleighova zložka v DTS	18
3.3.2 Brillouinova zložka v DTS	18
3.3.3 Ramanova zložka v DTS	18
3.4 Použitie DTS	19
4 Teória spájania optických vlákien	21
4.1 Spoje nerozoberateľné	21
4.1.1 Tavné zváranie	21
4.1.2 Lepené spoje	22
4.1.3 Mechanické spoje	22
4.2 Spoje rozoberateľné	23
5 Spojky	24
5.1 SC/PC konektory	24
5.2 SC/APC konektory	24
5.3 V-drážka	25
5.3.1 FibrLok	25
5.4 E2000 konektory	26
6 Nástroje pre spojovanie optických vlákien	28
6.1 Stripovacie kliešte	28
6.2 Lámačka optických vlákien	29
6.3 Čistiace prostriedky	29
6.4 Zváračka optických vlákien	31

6.5	Ochrana zvaru optického vlákna.....	32
6.6	Montážny prípravok 3M Fibrlok II.....	32
7	Vypracovanie	34
7.1	Prípravok	34
7.2	Schéma zapojenia	35
7.3	Pracovisko.....	36
7.4	Výber spojok a vlákna	37
7.5	Kalibrácia.....	37
7.6	Meranie spojov	42
7.6.1	Zvar.....	42
7.6.2	PC	43
7.6.3	APC.....	44
7.6.4	Fibrlok.....	45
7.6.5	E2000.....	46
7.7	Zhodnotenie	46
8	Záver	48

1 Úvod

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zisťovanie vplyvu rôznych optických spojov na meranie pomocou DTS systému. Keďže DTS systémy sa v súčasnosti začínajú používať pre meranie teploty a mechanického namáhania pozdĺž optického vlákna, spoje vyskytujúce sa v optickej trase môžu mať rušivý vplyv na presnosť merania touto metódou.

Distribuované teplotné systémy (DTS) pracujú na báze spätného rozptylu (OTDR) šíreného svetla v optickom médiu. Pre lepšie pochopenie funkcie DTS systému sú v prvej časti bakalárskej práce opísané druhy vznikajúcich rozptylov a procesy, za ktorých tieto rozptyly vznikajú. V naväzujúcej kapitole sú detailne vysvetlené jednotlivé zložky rozptylov v súvislosti s DTS systémom, na základe ktorých systém vyhodnocuje meranú optickú trasu.

Ďalšia časť práce načína teóriu spájania optických vlákien a rozdeľuje optické spoje do niekoľkých kategórií. Pri realizácii praktickej časti je vhodné poznať spektrum možných spojov a ich výhody/nevýhody. Druhy spojov vybraných pre praktickú časť sú analyzované v štvrtej kapitole, ktorá predstavuje základné vlastnosti, techniku spájania a možnosti použitia daných spojov. Nasledujúca kapitola patriaca do rodiny spájania optických vlákien popisuje základné nástroje potrebné pre vykonávanie spojov, pomocou ktorých bola vykonávaná praktická časť tejto práce.

Predposledná kapitola je venovaná vypracovaniu praktickej časti bakalárskej práce. Kapitola zoznamuje čitateľa s postupom merania, kalibráciou použitého DTS systému a metódou získavania výsledných hodnôt z merania. Popis praktickej časti sa sústreďuje na objasnenie zvolenej techniky merania, vysvetľuje formu zvolených prípravkov na ktorých boli merania vykonávané a pre lepšiu predstavu zahrňuje opis daného pracoviska. Proces merania jednotlivých spojov spolu so vzájomným porovnaním a vyhodnotením výsledných hodnôt spojov je súčasťou uzatvárajúcou túto kapitolu týkajúcou sa praktickej časti.

V poslednej kapitole sú zmienené záverečné dosiahnuté výsledky a rozbor príčin vzniknutých problémov.

2 Rozptyl svetla

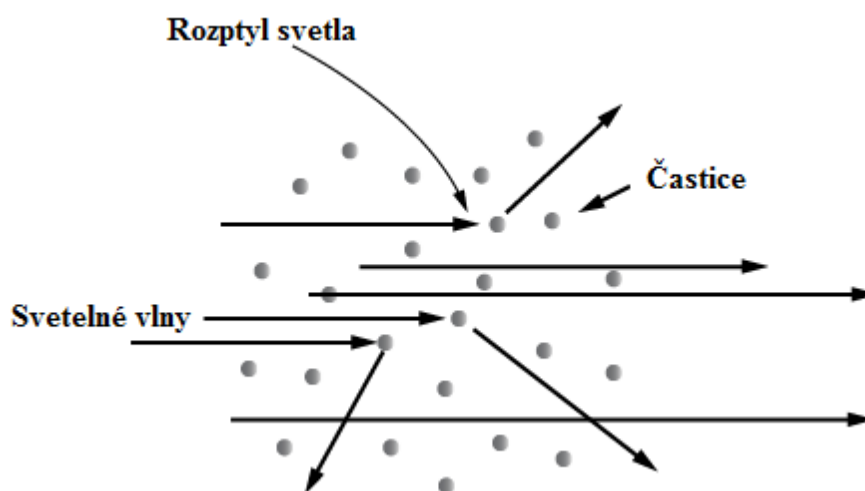
Elektrické pole elektromagnetickej vlny, ktorá sa šíri prostredím pôsobí na elektróny atómov alebo molekúl. Tieto elektróny vyžarujú sekundárne vlny. Je známe, že v homogénnom prostredí sa rovinná svetelná vlna šíri len v priamom smere, do strán sa teda nerozptyľuje. Takýto výsledok zloženia všetkých sekundárnych vln súvisí s ich koherenciou.

Podrobnejším rozborom je možné ukázať, že skladanie sekundárnych vln v homogénnom prostredí dáva len priamu vlnu už za podmienky, že všetky sekundárne zdroje (elektróny v elementárnom objeme) sú rovnaké. Táto podmienka je splnená pre ideálne homogénne prostredie. V takomto prostredí sa svetlo nerozptyľuje. Z makroskopického hľadiska je rozptyl svetla podmienený len nehomogenitou prostredia. Keď je homogenita prostredia narušená, málo rozptýlené svetlo predstavuje len malú časť pôvodného zväzku. Vo vysokokvalitnom skle, alebo vo veľmi čistej vode zväzok svetla, ktorý sa takýmto prostredím šíri pri pohľade z boku nevidíme. Avšak situácia je opačná, ak sú vo vode malé bublinky vzduchu, alebo sa v nej nachádzajú malé rozptýlené častočky. Rozptyl svetla môžeme pozorovať aj vtedy, keď prostredie obsahuje rozptýlené častočky menšie než je vlnová dĺžka λ svetla. Vtedy ich okom nevidíme. Takéto prostredie nazývame matným. [1]

2.1 Rayleighov rozptyl

Je rozptyl elektromagnetického žiarenia časticami, ktorých polomer je približne $1/10$ vlnovej dĺžky žiarenia. Tento proces bol pomenovaný na počesť Lorda Rayleigha, ktorý tento jav popísal a publikoval v roku 1871. V skratke Rayleighov rozptyl je jav materiálu, ktorý prispieva k útlmu žiarenia v skle. Náhodné zmeny rozloženia molekúl v skle vytvárajú náhodné nehomogenity v rozložení hodnôt indexov lomov a tieto priestorové fluktuácie pôsobia ako slabé rozptylové centrá.

Uhol prostredníctvom ktorého je slnečné svetlo rozptýlené molekulami plynov v ovzduší, ktoré ich tvoria, je nepriamo úmerný štvrtéj mocnine vlnovej dĺžky a preto modré svetlo tvoriace krátkou vlnovou dĺžkou koniec viditeľného spektra, bude rozptýlené silnejšie, ako bude dlhá vlnová dĺžka červeného svetla. Z toho vyplýva, že na kratších vlnových dĺžkach dochádza k silnejšiemu rozptylu ako na dlhších vlnových dĺžkach. V reálnom živote sa to javí modrým svetlom na oblohe, pretože v smeroch iných ako k Slnku, pozorovateľ vidí len rozptýlené svetlo.



Obrázok 2.1: Rayleighov rozptyl svetla

Keď na rozptyľujúce prostredie dopadá monochromatické svetlo, pričom nedôjde k zmene vlnovej dĺžky λ (alebo kruhovej frekvencie ω), hovoríme o Rayleighovom rozptyle.

Rayleighove zákony tiež predpovedajú kolísanie intenzity rozptýleného svetla určitým smerom, čo je výsledkom kompletnej symetrie predného rozptylu a spätnom rozptyle jednotlivých častíc. Taktiež predikujú polarizáciu rozptýleného svetla. [2], [3]

2.2 Brillouinov rozptyl

Brillouinov rozptyl spolu s Ramanovým patrí do skupiny kvázielastického rozptylu, kde svetlo mení svoju energiu vyžarovania. Z teórie tuhých látok je známe, že elektromagnetická vlna (svetelná vlna), môže v tuhej látke, v kvapaline alebo plyne interagovať s inými typmi vln, napr. akustickými vlnami, v magnetickej látke so spinovými vlnami a podobne. Brillouinov rozptyl je rozptyl svetelnej vlny na akustickej vlne. Ak sa v procese interakcie svetla s fonónmi zúčastňujú optické fonóny, jedná sa o Ramanov rozptyl, ak akustické fonóny, hovoríme naopak o Brillouinovom rozptyle.

Zúčastnené spomenuté akustické fonóny sú vyvolané tepelnými vlnami prostredia. Pri pružnej deformácii prostredia, či pri zmene hustoty kvapaliny alebo plynu dochádza k zmene indexu lomu týchto prostredí.

Brillouinov rozptyl je využívaný pri štúdiu vlastností rozptyľujúcich prostredí. Brillouinov stimulovaný rozptyl nastáva pri veľkej intenzite dopadajúceho žiarenia, kedy sa môže intenzita rozptýleného žiarenia blížiť k intenzite žiarenia dopadajúceho.

2.2.1 Stimulovaný Brillouinov rozptyl

Stimulovaný Brillouinov rozptyl je založený na meraní charakteristík Brillouinovho rozptylu. Brillouinov rozptyl je prirodzený rozptyl spojený so šírením svetla v prenosovom médiu ako je optické vlákno. Vzhľadom k interakcii svetla s rozptyľujúcimi časticami prenosového média, ktoré spôsobujú

rozptyl šíriaceho svetla v optickom vlákne, sú generované: Rayleighová, Brillouinová a Ramanová zložka. Brillouinová interakcia spôsobuje generovanie rozptýleného svetla (Brillouinovej zložky), ktoré predstavuje frekvenčný posun v porovnaní so svetlom vyvolávajúcim túto interakciu. Tento posun môže byť spojený s prítomnosťou nehomogenít asociovanými s akustickými vlnami v kremičitých vláknach.

Systém založený na analýze Brillouinovho rozptýleného svetla v optických vláknach je prirodzene schopný vykonávať meranie teploty a mechanického namáhania. Tento proces je dosahovaný vďaka závislosti Brillouinovho posunu na rýchlosti akustickej vlny závislej na teplote a tlaku. [1], [4]

2.2.2 Brillouinov frekvenčný posun

Akustická rýchlosť je priamo závislá na materiállovej hustote vo vlákne, ktorá je závislá na teplote prostredia a deformácii vlákna. V dôsledku toho Brillouinov posun skutočne závisí na lokálnej teplote a mechanickom namáhaní. Brillouinov frekvenčný posun je preto vnútorný parameter kremičitého vlákna a jeho meranie poskytuje informácie o lokálnej teplote vlákna a mechanickom stave vlákna.

Prístroje zložené na stimulovanom Brillouinovom rozptyle (SBS) sú známe ako Brillouin Optical Time Domain Analysers alebo BOTDA, na rozdiel od Brillouin Optical Time Domain Reflectometers (BOTDR), ktoré sú založené na spontánnom Brillouinovom spätnom rozptyle. [4], [5]

2.3 Ramanov rozptyl

K rozptylu žiarenia na molekulách dochádza v okamžiku, keď sa väčšina fotónov vstupujúceho žiarenia zrazí s molekulou skúmanej látky. Pre porovnanie, pri Rayleighovom rozptyle sa pri pružnej zrážke energia odrazeného fotónu (ani molekuly) nezmení a u vzniknutého rozptýleného žiarenia nedochádza k zmene vlnovej dĺžky oproti žiareniu budiacemu. Naopak pri Ramanovom rozptyle sa podstatne menšia časť žiarenia účastní na nepružných zrážkach fotónov s molekulou. Keď dôjde k nepružnej zrážke, predá dopadajúci fotón časť svojej energie molekule alebo od nej isté kvantum energie prijme. Takto vzniknuté rozptýlené žiarenie bude mať rozdielnú frekvenciu od žiarenia budiaceho. [6]

Rovnako ako pri Brillouinovom rozptyle, Ramanov rozptyl je tiež interakcia svetleného pulzu s tepelne budenými atomickými alebo molekulárnymi vibráciami. Čo sa týka intenzity, Ramanov rozptyl je najmenší z troch spätno rozptýlených signálov. Ramanov spätný rozptyl má dve zložky, ktoré ležia symetricky k Rayleighovmu vrcholu: časť tzv. Stoke a Anti-Stoke. Ramanova Anti-Stoke zložka intenzity je teplotne závislá, zatiaľ čo Stoke zložka je teplotne necitlivá. [4], [7]

2.4 Špecifikácia rozptylov

Pre zjednodušenie a vyzdvihnutie podstatných rozdielov medzi jednotlivými rozptylmi je možné povedať, že pri vzniku Ramanovho rozptylu zohrávajú úlohu atómové a molekulové vibrácie. Hmotné nečistoty vo vlákne majú za následok Rayleighov rozptyl a Brillouinov rozptyl je výsledkom tepelne budených akustických vln. [4]

3 Systém DTS

3.1 História

DTS systém (The fiber optic Distributed Temperature Sensing) používajúci metódu Ramanovho efektu bol vyvinutý začiatkom 90tých rokov na Southampton University v Anglicku. DTS technológia je založená na princípe merania metódou spätného rozptylu OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) a používa techniku podobnú testovaniu telekomunikačných káblov.

3.2 Metóda OTDR

OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) metóda bola vyvinutá pred viac ako 20 rokmi a stala sa priemyselným štandardom pre meranie strát v telekomunikáciách. Princíp ODTR je pomerne jednoduchý a je veľmi podobný meraniu v letectve pomocou radarov. Podstatou je úzky laserový pulz poslaný do vlákna a späťne odrazené svetelné impulzy (Rayleighov rozptyl) sú analyzované. Na základe doby trvajúcej putujúcemu odrazenému svetlu do detekčnej jednotky je možné určiť: celkový útlm trasy, dĺžku trasy, kontinuitu trás pre overenie správnosti montáže optickej trasy a optických rozvádzačov, nehomogenitu vlákien, útlm všetkých zvarov a spojok a merný útlm všetkých jednotlivých káblových dĺžok trasy.

V oboch prípadoch monitorovacích a telekomunikačných priemysloch sú používané dva typy technológií pre snímanie a kontrolovanie kvality/zdravia optického vlákna. Tieto dve technológie sú známe ako OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) a OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry).

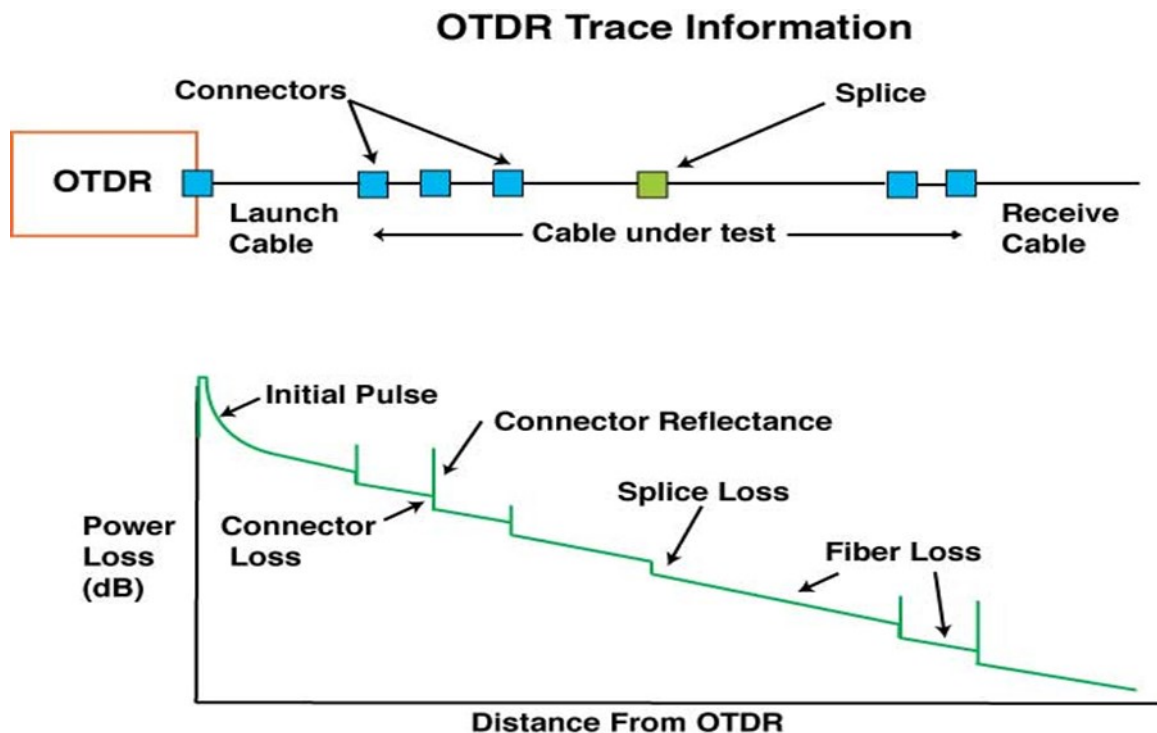
V telekomunikačnej sfére je najviac používaná OTDR metóda. Snímacie alebo monitorovacie systémy v priemysle a väčšina DTS systémov vychádza z konceptu OTDR bázy. Dôvodom prečo OTDR je vynikajúce pre telekomunikačné zariadenia a distribuovane snímanej teploty je prínos niekoľkých technických výhod.

Výhody:

- **Robustnosť merania** – OTDR je menej náchylné na potenciálne anomálie vo vnútri vlákna a príslušenstvo (napr. ohyby, spojky, odrazy).
- **Rozsah** – OTDR využíva nelineárne (nepružné) javy spôsobujúce návrat časti svetelného impulzu na detektor, ktoré nazývame stimulovaný Ramanov a Brillouinov rozptyl. DTS systémy používajúce Ramanov stimulovaný rozptyl využívajú mnohovidové optické vlákna s veľkou hodnotou numerickej apertury pre maximálne vedenie späťne odrazeného svetla, pretože veľkosť späťne odrazeného Ramanového rozptylu je pomerne malá. Útlmová

charakteristika mnohovidového vlákna je väčšia ako u jednovidového, čo obmedzuje dosah DTS systémov využívajúcich stimulovaných Ramanových spätných rozptylov na 8-10 km. Naproti DTS systémy pracujúce s Brillouinovým rozptylom používajú jednovidové vlákna a sú schopné merať teplotu do vzdialeností až 30 km.

- **Presnosť** – OTDR je schopná merať teploty s citlivosťou 0,01 °C.
- **Meranie parametrov** – OTDR je viacstranná technológia pre distribuované snímanie, umožňuje merať distribuované teploty a distribuované napätia.
- **Bezpečnosť lasera** – Väčšina OTDR distribuovaných systémov pre snímanie teploty sú klasifikované ako 1M skupina. Výsledkom je bezpečnosť za každých primeraných pracovných podmienok, navyše väčšina OTDR DTS systémov sú bezpečné pre použitie v prostredí s hodnotením zóny nebezpečenstva v súlade s predpismi EÚ EUR16011EN (1944). [8], [9], [10]



Obrázok 3.1: Výsledok analýzy OTDR reflektometrom

3.3 Popis technológie DTS

DTS systém meria teplotu pomocou optického vlákna miesto termočlánkov alebo termistorov, ako sa zvyčajne používali v minulosti. Systémy DTS predstavujú nákladovo efektívny spôsob pre získanie veľmi presných hodnôt merania teploty.

V technike DTS je pulzný laser spojený s optickým vláknom cez priamy väzobný člen. Svetlo je spätne odrazené ako impulz šíriaci sa vláknom vzhľadom ku zmenám v hustote a zložení, ako aj

molekulárnych a rozsiahlejších vibrácií. V homogénnom vlákne sa intenzita späťne odrazeného svetla rozkladá exponenciálne s časom.

Vzhľadom k tomu, že rýchlosť šírenia svetla v optickom vlákne je dobre známa, vzdialenosť môže byť určená z času späťne odrazeného svetla. Odrazené svetlo sa skladá z rôznych spektrálnych zložiek v dôsledku rôznych mechanizmov interakcie medzi šíreným svetelným pulzom a optickým vláknom.

Tieto späťne rozptýlené spektrálne zložky zahŕňajú Rayleighové, Brillouinové a Ramanové vrcholy a pásma.



Obrázok 3.2: DTS systém DITEST STA-R

3.3.1 Rayleighova zložka v DTS

Rayleighová rozptýlená zložka je najsilnejšia v dôsledku kolísania hustoty a zloženia, zároveň má rovnakú vlnovú dĺžku ako primárny laserový pulz. Rayleighová zložka riadi hlavný sklon krivky útlmu intenzity a môže byť použitá na identifikáciu náhlych zmien a heterogenosti pozdĺž vlákna. Rayleighová zložka nie je citlivá na teplotu.

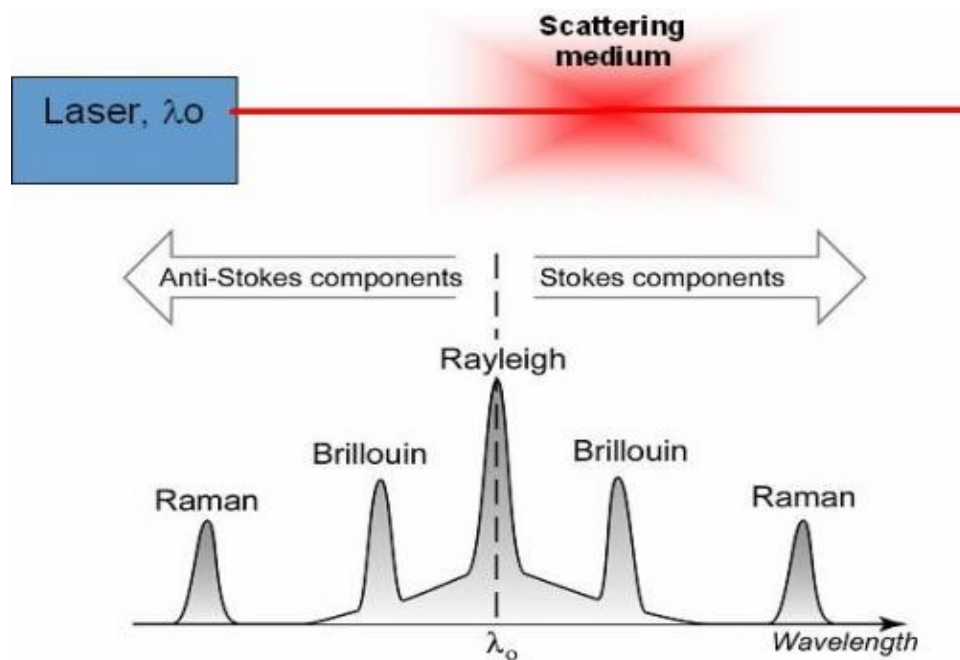
3.3.2 Brillouinova zložka v DTS

Brillouinové späťne odrazené zložky sú spôsobené mriežkovými vibráciami zo šíriaceho sa svetelného pulzu. Avšak tieto vrcholy sú spektrálne tak blízko k primárnemu laserovému pulzu, že je ťažké oddeliť zložky Brillouina od Rayleighova signálu.

3.3.3 Ramanova zložka v DTS

Intenzita Anti-Stoke oblasti je menšia ako Stoke oblasť, ale je silne závislá na teplote vzhľadom k tomu, že intenzita Stoke časti súvisí teplotou len slabo. Výpočtom pomeru Anti-Stoke k Stoke je

možné získať presné hodnoty merania teploty. Kombináciou tejto techniky merania teploty s meraním dĺžky vlákna odrazom svetla, DTS poskytuje meranie teploty postupne po celej dĺžke vlákna. [4]



Obrázok 3.3: Rozptyľujúce zložky v optickom vlákne

3.4 Použitie DTS

Monitorovanie teploty na báze optických vlákien má v niektorých prípadoch užitočnú výhodu.

Prehľad výhod:

- Keď je potrebné použiť veľké množstvo senzorov. V prípade, že je nutné umiestniť väčšie množstvo snímačov, pochopiteľne je vhodná inštalácia optických vlákien s DTS. Jedno vlákno dokáže nahradiť veľký počet snímajúcich článkov, takže všetko čo je treba zabezpečiť, je smerovať vlákno tak, aby pokrylo potrebnú hustotu a plochu merania.
- Ak dopredu nepoznáme rozmiestnenie senzorov. Nie vždy pri predbežnom navrhovaní projektu je možné určiť správne umiestnenie teplotných senzorov. Vysoké priestorové rozlíšenie a rozsah optických vlákien umožňujú operátorovi zvoliť oblasti monitorovania neskôr po ukončení projektu.
- Keď elektrické pole znemožňuje meranie. V situáciách, kde existuje veľký vplyv elektromagnetického šumu, sa môžu dáta prijímané z termočlánkov a termistorov poškodiť. Avšak dáta, ktoré sú čítané pomocou DTS sú čisto optické, v čom je ich imúnosť voči takémuto rušivému prostrediu.

- Keď elektrické monitorovanie teploty nie je bezpečné. V určitých prípadoch existuje riziko iskrenia všetkých elektrických systémov. Ak sa atmosféra v monitorovanom priestore javí takto nestabilná, potom skutočnosť, že optické vlákna nepredstavujú nebezpečenstvo môže byť dôležitá bezpečnostná výhoda. [7]

4 Teória spájania optických vlákien

Takisto ako na útlm, sú kladené požiadavky aj na optický spoj. Pri spoji sa nesmie zanedbať výber vhodnej techniky spájania optických vlákien, ktorá následne určí budúce vlastnosti spoja. Podľa prevedenia spoja sa zaraďuje spoj do skupiny rozoberateľných alebo nerozoberateľných spojov. V súčasnosti dnešné technológie umožňujú rôzne varianty vykonávania spojov, vďaka ktorým sa môže vyhotoviť vhodný spoj pre reálne podmienky jeho okolia.

V praxi môžu byť zohľadňované konštrukčné prevedenia spojov (viacnásobný/individuálny spoj, trvanlivosť, hustota vnútorného usporiadania, univerzálnosť inštalácie, veľkosť optických strát, zložitosť metódy), montážne vlastnosti (mechanická robustnosť, odolnosť voči prostrediu, stabilita strát spoja) ale aj ekonomické faktory (cena materiálu pre spoj, nástroje a náklady). Určité vlastnosti závisia, či budú použité jednovidové alebo mnohovidové. [11]

4.1 Spoje nerozoberateľné

Nerozoberateľné spoje nachádzajú uplatnenie v komunikáciách, kde sa neuvažuje o rozpojení trasy v budúcnosti. Väčšinou sú to trasy dlhé niekoľko kilometrov a požaduje sa na nich minimálny útlm. Metódy tavného zvárania a metódy spojovania optických vlákien lepením sa zaraďujú medzi priame spoje a najnovšia metóda pevných metalických spojok patrí do skupiny nepriamych spojov. [12]

4.1.1 Tavné zváranie

Spoje majú presne zvarené konce dvoch vlákien, zvarený spoj vykazuje dnes bežne útlm aj pod 0,05 dB na SMF. Zariadenie pre vytvorenie zvareného spoja je prenosné a umožňuje vykonávanie spojov v teréne. Zo známych metód sa najviac ujalo a rozšírilo zváranie elektrickým oblúkom. Menej používané sa stalo zváranie vlákien plynovým plameňom (špeciálny mikrohorák) a zváranie laserom CO₂. Pri zváraní dvoch vlákien je dôležité, aby nedošlo k zúženiu priemeru vlákna, preto sú konce pri zváraní prisúvané k sebe. Tieto operácie sú kontrolované automaticky mikroprocesorom zväračky. Podľa typu skla vlákna sú nastavené potrebné časy na natavenie koncov vlákien a vlastného zvarenia.

Vlastné zváranie nastáva v okamžiku, keď sú konce vlákien od seba vzdialené približne 20 μm za dobu asi 0,2 s., behom ktorej sú konce vlákien natavené a približované k sebe s presahom asi 15 μm. Celková doba ťahania oblúku je asi 2.5 s.

Po prevedení zvaru sa skúša pevnosť spoja a určuje sa vplyv spojky na útlm meraním. V prípade, že zvarené vlákno vykazuje nedostatky pevnosti alebo neprijateľný útlm spoja, je nutné spoj roztrhnúť a vykonať nový. Najčastejšie prípady chýb sú výsledkom zúženia alebo naopak vypuknutia profilu vlákna, nepretavenia skla po celom jeho obvode, vznik bublín alebo odchýlka osí vlákien.

Po dokončení zvaru vlákien je potrebné obnoviť primárnu ochranu vlákna potiahnutím špeciálneho silikónu po mieste zvaru a následne nahriať samostťahovaciu plastovú ochranu v podobe bužírky alebo dutinky, ktorá perfektne fixuje vlákno v jeho zvare a jeho okolí. Mechanická pevnosť spoja dosahuje 70% pevnosti vlákna a útlm približne 0,02 dB.

4.1.2 Lepené spoje

U týchto spojov sa používa ako hlavná zložka epoxidové lepidlo k prilepeniu vlákien dohromady alebo k podkladu. Kvalitné lepidlo musí mať veľmi podobný index lomu ako vlákno. Súčasne plní funkciu ochrany spoja pred prostredím a zabraňuje deformáciám spoja. Pomáha pri zaistení vlákna v patričnej polohe a zaisťuje jeho pevnosť v ťahu.

Najčastejší typ spojky používaný v optických trasách pozostáva z trubičky s vnútorným otvorom. Do tohto otvoru sú vložené konce vlákien, ktoré sa následne zalepia, prípadne sa trubička termoplasticky stiahne. Ďalšou možnosťou je trubička obsahujúca špeciálny UV vytvrdnuteľný materiál, ktorý po ožiarení fotochemicky polymeruje a získa spájajúce vlastnosti.

Straty týchto spojov sú zvyčajne 0,1 dB a menej. Spoje sú citlivé na zmenu teploty. Ďalšia strata 0,1 dB môže nastať po teplotnom cykle -30° C až +70° C. [11], [12], [13]

4.1.3 Mechanické spoje

Existuje viacero princípov mechanických spojov. Bezpodmienečné osové vyrovnanie vlákien sa pri mechanických spojoch vykonáva za pomoci niekoľkých prídavných prvkov, ktoré zdokonaľujú, zlacňujú alebo urýchľujú spojovanie optických vlákien. Môžu byť určené pre jednovláknové alebo viacvláknové spoje podľa počtu spojovaných vlákien. Jednou z metód umožňujúcich takéto centrovanie osí vlákien je použitie tzv. V-drážky potrebných rozmerov, do ktorej sa potrebné vlákna spoja proti sebe. Táto metóda sa používa pre nerozoberateľné ale aj rozoberateľné spoje.

Pre trvalé dosiahnutie optického útlmu menšieho ako 0,3 dB je potrebné použiť optický združovací materiál medzi koncami vlákien. Výber materiálu závisí od optických vlastností skla. Väčšinou sú to silikónové gély, optické tuky a ultrafialové lepidlá. Lepenie organickou živicom sa v telekomunikáciách nepoužíva, ale je to jedna z možností. Združovacie materiály musia ostať v kontakte s oboma materiálmi i pri zmene medzery. Tieto materiály slúžia zároveň ako primárna ochrana holého jadra. Pri použití lepidiel je zaistená aj mechanická odolnosť spoja. Optická strata mechanického spoja sa pohybuje okolo hodnôt 0,1 až 0,15 dB.

Stláčateľné pevné mechanické rýchlospojky sú najhorúcejšia novinka v rodine mechanických spojov a reprezentujú veľmi kvalitné spoje s útlmom 0,1 dB, ktoré sú zaručené pre každú spojku, pričom 30% z nich dosahuje hodnôt 0,02 dB.

Pri takýchto spojoch sa postupuje v prvom rade odizolovaním a odstránením primárnej ochrany, narezaním vlákna a jeho zalomením, potretím koncov vlákien špeciálnym gélom a zasunutím

koncov vlákien do stláčateľnej spojky. Rukou sa vyvinie tlak, ktorým prevedieme spoj. Takto realizované spojky sú vysoko kvalitné, presné a rýchle. [11], [12]

4.2 Spoje rozoberateľné

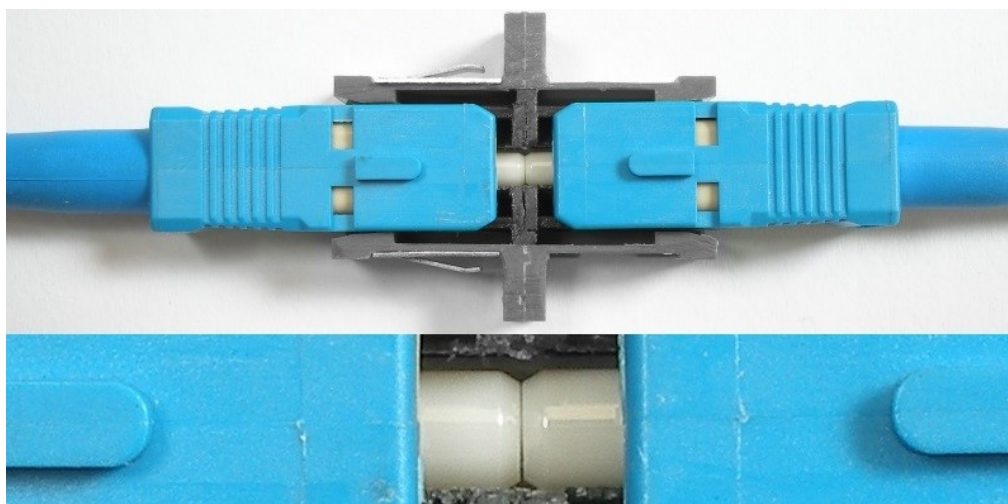
Pre túto skupinu spojov sa používajú konektory. Konektory môžu byť pre jednotlivé vlákna alebo pre duplex káble, prípadne viacžilové páskové káble. Dosahovaný útlm býva v rozmedzí 0,3 dB až 1,5 dB od čoho sa odvíja cena konektoru. Optické konektory musia byť spoľahlivé, zaisťovať súososť optických vlákien a musia byť necitlivé na vplyvy vonkajšieho prostredia, ako je teplota, prach a vlhkosť. [12]

5 Spojky

5.1 SC/PC konektory

Beznástrojové optické gélové konektory, ktoré ako prvé na svete nevyžadujú špeciálny prípravok na svoju inštaláciu a nie je nutné žiadne lepenie ani brúsenie. Celé uchytenie je založené na mechanickom princípe.

Typickým pre tento konektor je gél obsiahnutý v jeho tele, ktorý má podobné vlastnosti ako jadro optického vlákna. Vďaka gélu sa vytvorí spojenie medzi optickou ferrulou s predpripraveným predlešteným vláknom a optickým vláknom ktoré konektujeme.



Obrázok 5.1: Spojenie dvoch SC/PC konektorov

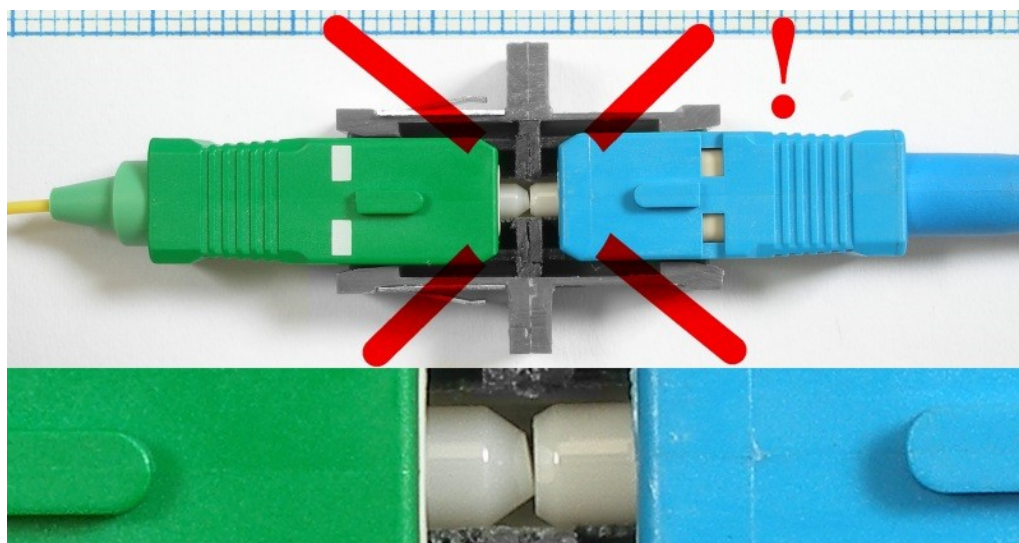
Pri inštalácii je potrebná len lámačka optických vlákien, stripovacie kliešte, IPA čistiaci prostriedok a čistiace obrúsky. Aj napriek minútovej inštalácii a nízkej cene sa konektor vyznačuje nízkym vložným útlmom približne 0,2 dB. [14]

5.2 SC/APC konektory

Tieto konektory majú rovnaké inštalačné vlastnosti ako SC/PC konektory, líšia sa však šikmým brúsením ferule (APC – angled physical polish contact). Tento typ zabrúsenia spôsobuje nízku úroveň svetla odrazeného späť do konektoru. V porovnaní s PC konektormi, pre APC je špecifická menšia svetlovlnná odrazivosť (pre PC konektory – 55 dB, pre konektory APC – 65 dB). Inými slovami, čím vyšší je útlm odrazu, tým lepší je výkon zo spojenia dvoch konektorov.

Táto vlastnosť v praxi činí konektory s brúsením APC vhodné pre všetky systémové komponenty, ktoré sú citlivé na svetlo, respektíve spätnú svetelnú odrazivosť. Vložený útlm konektora

je 0,2 dB. SM optické vlákna môžu byť s PC alebo APC leštenými konektormi, ale MM vlákna nie sú vyrábané s APC konektormi. Špecifická farba tohto typu konektora je zelená. [14], [15]



Obrázok 5.2: Nesprávne spojenie SC/APC a SC/PC konektora

5.3 V-drážka

Pri tejto spojke je optické vlákno vložené do V-drážky vo vhodnej podložke. Podložky sú väčšinou materiálu kov, plast, sklo alebo keramika. Materiál spojky musí mať podobný koeficient teplotnej rozťažnosti ako koeficient vloženého vlákna. Tým sa zaisťujú minimálne vložné straty pod vplyvom teplotných zmien. Vložené vlákno vo V drážke sa zaleje epoxidovým lepidlom a prikryje sa platničkou. Vzniká tak tzv. sendvičová spojka špecifická útlmom približne 0,1 dB. Medzi V-drážky sa zaraďuje známa spojka Fibrlok. [16]

5.3.1 FibrLok

Táto mechanická spojka poskytuje precíznu, jednoduchú a cenovo lacnú metódu spájania optického vlákna. Spojenie spočíva v odstripovaní vlákna od ochrany, jeho očistenia a zalomenia. Môže sa použiť na spájanie vonkajších alebo vnútorných optických rozvodov, prípadne na zakončenie konektorov, pigtailov. Je určená na spájanie singlemódových a multimódových optických vlákien. Spojka obsahuje špeciálny gél, ktorý má rovnaký index lomu ako index lomu optického vlákna. Princíp spájania spočíva vo využití presného kovového elementu umiestneného v puzdre z umelej hmoty s aretačným viečkom. Pri montáži je potrebný len jednoduchý montážny prípravok pomocou ktorého dôjde k stlačeniu presného kovového elementu, ktorý následne vystredí spojované vlákna proti sebe a súčasne zaisťuje fixáciu proti ich ďalšiemu pohybu. Spojka sa vyznačuje útlmom pod 0,1 dB.



Obrázok 5.3: Spojka 3M Fibrlok II

Technológia mechanického spájania optických vlákien FIBRLOK je na základe overených skúseností považovaná za najvhodnejšiu techniku zakončovania optických vlákien na účastníckej zásuvke. Pre svoje užitočné vlastnosti splňuje požiadavky vysokej kvality, rýchlej montáže, jednoduchosti a výbornému pomeru cena/úžitková hodnota. Fibrlok slúži ako bezkonkurenčná plnohodnotná náhrada optických zvarov. Pri inštalácii nevyžaduje elektrinu ani epoxid, je teda pre svoju nenáročnosť na spoj široko používaná v servisných operáciách, kde rozhoduje zmluvne viazaný čas znovu sprevádzkovania optických vlákien. [17]

5.4 E2000 konektory

Modelovo označené konektory E2000 od firmy DIAMOND® sú čím ďalej tým viac používanéjšie v komunikáciách pre svoje perfektné vlastnosti. Poznávacíou vlastnosťou tohto konektora je ochranná čiapočka, ktorá zvyšuje bezpečnosť zirkónovej ferrule. Ušľachtilý materiál zaisťuje hraničný útlm pod 0,1 dB. Tento útlm zaisťuje dizajn aktívneho zarovnania jadra ACA (Active Core Alignment) garantujúci dokonalú súososť, menšie vložné straty a bezkonkurenčnú opakovateľnosť.

Spomenutá Pilzferrula (PZF) je najnovšia generácia DIAMOND® technológie ferrúl, ktorá poskytuje vysoký výkon pri podstatne nižších nákladoch. Konštrukcia pilzferrule sa skladá z troch zložiek:

- Povrch ferrule potiahnutý oxidom kremičitým (nahrádza skoršie používaný drahý karbid volfrámu).
- Vnútorňa ochrana INVAR (Fe-Ni zliatina).
- Rozšírená vložka nikel-striebro zliatiny (základ ACA dizajnu).



Obrázok 5.4: Konektor DIAMOND® E2000

Precízne vyrobené vonkajšie telo potiahnuté oxidom kremičitým garantuje výbornú opto-mechanickú kvalitu konektorov. V porovnaní s bežnými keramickými ferrulami, DIAMOND® ferrula disponuje niekoľkými výhodami:

- DIAMOND® ferrule sú oveľa viac tolerantnejšie čo sa týka variácií polomerov vlákien a ich nerovnomernými zakončeniami.
- DIAMOND® ferrule zabezpečujú dôsledný „core-to-core“ kontakt pre najmenšie vložné straty. To platí nie len pre spojenie DIAMOND® ferrúl medzi sebou ale aj pre spájanie s keramickými konektormi od iných výrobcov.
- DIAMOND® ferrule ponúkajú najvyšší výkon spätného útlmu vďaka čelu ferrule s prímiesou zliatiny skla, ktorá zaisťuje lepšiu kontrolu vlastností čistoty čela ferrule.
- Znížená tvrdosť čela DIAMOND® ferrule NS zliatiny (v porovnaní so sklom) poskytuje lepšiu stabilitu pri vibráciách a za podmienok extrémnych teplôt. [18]

6 Nástroje pre spojovanie optických vlákien

Pri spájaní optických vlákien musí byť známy typ spojky, ktorý sa bude aplikovať. Z tohto dôvodu sa potom používajú konkrétne nástroje pre úpravu koncov optických vlákien. Samotné konce optických vlákien sa líšia od seba len mierou odstránenia plášťa a prípadne vonkajšej ochrany. Ďalej v kapitole sú obecné popísané použité nástroje.

6.1 Stripovacie kliešte

Špeciálne stripovacie kliešte slúžia na odstránenie plášťa optického vlákna, prípadne tiež sekundárnej ochrany. Zvyčajne sú vyrábané pre 250 μm izoláciu na 125 μm vlákne. Pre odstripovanie plášťa sú určené otvory s 2-3 mm priemerom. [19]



Obrázok 6.1: Konektor DIAMOND® E2000 Lámačka optických vlákien

6.2 Lámačka optických vlákien

Lámačky umožňujú zalamovanie optického vlákna v jedinom kroku. Dokážu zalamovať vlákna v primárnej ale aj sekundárnej ochrane. Lámačka zalamuje vždy len jedno vlákno, kde potom ulomený (ďalej nepoužiteľný) kus vlákna dopadne priamo do kontajnera na odseknuté vlákna, ktorým väčšina lámačiek disponuje. Nástroj v lámačke je vybavený ostrým nožom, ktorého funkčnosť je výrobami garantovaná pre vyše 40 až 60 tisíc zalomení. Po konci životnosti ho môže sám používateľ vymeniť jednoducho za nový.



Obrázok 6.2: Lámačka optických vlákien Swift CI-02

Lámačka obsahuje pravítko, podľa ktorého sa umiestňuje predpripravené odstripované vlákno do špeciálne určených drážok (žľabov). Vlákno musí byť v mieste zalomenia odstripované od primárnej ochrany (plášťa). Podľa budúceho určenia použitia vlákna je dôležité vhodne zvoliť dĺžku „holého“ vlákna k miestu začínajúcej ochrany. Drážky bývajú väčšinou dve, určené pre obe úpravy vlákna pred budúcim spojom, prípadne konektorom. V prípade vlákna určeného napríklad pre zakončenie konektorom, vkladá sa vlákno do väčšej drážky usporiadanej aj pre sekundárnu ochranu (izoláciu). Ak vlákno bude určené pre spájanie tavným zvaraním, umiestňuje sa do drážky s menším priemerom. Vlákno sa zvykne v mieste zalomenia vytáčať do strán, preto je nutné dávať pozor a vlákno prispôbiť pred zafixovaním. Usadené vlákno v drážke sa ďalej zafixuje poistkou, ktorá vlákno zaistí proti pohybu a vykonaním jednokrokového mechanizmu sa vlákno kolmo na jeho osu zalomí. [20]

6.3 Čistiace prostriedky

Ako čistiace prostriedky pri spájaní optických vlákien sa používajú dva základné čistiace prvky.

Prvým je čistý isopropylalkohol 99,9 % (IPA, Isopropanol), ktorý je nutným vybavením každého servisného technika. Má vynikajúce odmasťovacie schopnosti a je kompatibilný s konštrukčnými materiálmi používajúcimi sa v elektronike. Je veľmi prchavý a používa v malých dávkach na navlhčených obrúskoch.



Obrázok 6.3: Čistenie optického konektoru bezprašným obrúskom

Čistiace bezprašné obrúsky sa používajú na čistenie optických konektorov, respektíve ich ferrúl a na čistenie odstripovaných vlákien. Podľa potreby môžu a nemusia byť namočené v izopropylalkohole. Obrúsok nesmie byť nikdy vystavený nečistým podkladom, pri čistení hrozí poškodenie čela ferrule jej poškrabaním. [19], [21]

6.4 Zváračka optických vlákien

Súčasný moderný nástroj pre spájanie optických vlákien tavením vykazuje veľmi nízky útlm a dobu vykonania spoja. Spájanie vlákien elektrickým oblúkom v priebehu približne siedmych sekúnd je bezkonkurenčné, čo sa týka rýchlosti prevedenia spoja.

Pre prevedenie zvaru si zváračka vyžaduje len odstránenie primárnej ochrany optického vlákna, zalomenie väčšinou na 12 mm, navlieknutie ochrany zvaru na jeden koniec spájaného vlákna a nakoniec očistenie vlákien od samotného skla po začínajúcu ochranu.

Konce vlákien sú uchytené v špeciálnych blokoch, kde na ich precízne spojenie „dozerajú“ kamery, ktoré snímajú kvalitu zalomeného vlákna. Softvér zváračky vyhodnotí oba konce ležiace proti sebe a v prípade nutnosti vyzve operátora k znovu ošetrovaniu problémového vlákna. Bezproblémové konce sú adaptívne automaticky posúvané do správnej polohy, aby sa zaistila čo najpresnejšia súosť jadier. Po korekcii polôh vlákien nastáva pôsobením elektrického oblúku homogénny spoj.

Spoj je pevný v ťahu ale nie v ohybe. Preto sa na spoj navlieka spomenutá ochrana optického zvaru, ktorá sa navlieka ešte pred samotným zvarom. Táto plastová bužírka nasadená priamo na zvare sa vloží do piecky zváračky, kde sa behom niekoľkých sekúnd pôsobením tepla nataví na spoj. Spoj je vo finále odolný voči ohybu a inému mechanickému namáhaniu. [22], [23], [24]



Obrázok 6.4: Zváračka optických vlákien Sumitomo T-71c

6.5 Ochrana zvaru optického vlákna

Ochrany zvarov optických vlákien sa vyrábajú o rôznych dĺžkach a pre rôzne prostredia. Typická dĺžka je okolo 40-60 mm. Ochrana tvorí mechanicky odolnú súčasť zváraného spoja. Je tvorená priesvitnou, tepelne sťahovacou hadičkou, ktorá obsahuje kovovú tyčinku. Po nahriatí v piecke zväračky sa ochrana stiahne na spoj a zaistí tak mechanickú a hermetickú odolnosť spoja optického vlákna.



Obrázok 6.5: Ochrana zvaru optického spoja

Ochrana zvaru slúži pre mechanickú odolnosť, zvar je veľmi pevný v ťahu, ale náchylný na prasknutie/zlomenie. Preto je v ochrane zvaru kovová výstuha. [25]

6.6 Montážny prípravok 3M Fibrlok II

Montážny prípravok 2501 pre spojky optických vlákien 3M Fibrlok II je určený pre prevedenie spoja V-drážkových mechanických spojok Fibrlok. Tento nástroj jednoduchý na obsluhu funguje na princípe zveráku, kde je spojka Fibrlok osadená. Ochrana vlákna začína 12,5 mm od konca vlákna. Osadená spojka obsahujúca už navlečené konce vlákien z oboch strán je stlačená montážnym nástrojom a kryt akčného členu po jeho stlačení spájané vlákna vyrovná a zafixuje. [26], [27]

7 Vypracovanie

Cieľom merania bolo zistiť výkyv Brillouinovej frekvencie potenciálne ovplyvnenej spojom, ktorý sme vykonávali na meranej optickej trase. Pri meraní sme používali DTS systém, prípravok, ohrevnú vaňu, vybrané spojky a nástroje pre spájanie optických vlákien.

Najprv sme si pripravili vzorky optických vlákien, ktoré sme medzi sebou prepojovali konkrétnym meraným spojom. Takto vytvorený prípravok sme zapojili podľa schémy s DTS systémom (viď obr.7.2) a vykonali kalibráciu optickej trasy. Potom sme meranú optickú trasu ponorili do ohrevnej vane a vykonali 5 meraní. Medzi každým meraním spoja sme daný spoj vždy prerušili a znova spojili, aby sme dostali rozdielne výsledky a mohli neskôr dosiahnuté hodnoty spriemerovať. Po každom meraní sme skalibrovali prepočet Brillouinovej frekvencie na teplotu prostredníctvom DTS systému.

Po dokončení merania sme hodnoty z DTS systému exportovali a spracovali do grafickej podoby. Zaujímali nás frekvenčný odskok spôsobený daným spojom.

Namerané Brillouinové frekvencie v našich laboratórnych podmienkach pri teplote vody 70 °C sa mierne líšia s frekvenciami udávanými výrobcom DSTS systému v datasheete. Rozdiel je v tomto prípade asi 0,20 – 0,25 GHz. Brillouinová frekvencia totiž závisí od štruktúry použitého optického vlákna.

7.1 Prípravok

Prípravok sa skladal z dvoch vzoriek skúmaného SM optického vlákna, ktoré obsahovali v sebe každá 5 metrov namotaného optického vlákna o priemere 10 cm. Medzi vzorkami bola trasa 2 metre, v strede ktorej bol vždy vykonávaný určitý spoj, ktorý ich spojoval. Obe vzorky optického vlákna boli zakončené ST pigtailmi.

Volili sme dostatočne veľkú dĺžku vzorky, pretože DTS vyhodnocuje „kondíciu“ optickej trasy len v niektorých miestach. DTS umožňuje zmerať frekvenciu v 50 tisíc bodoch optickej trasy, to znamená, že v našej trase dlhej cca 1100 metrov dokázal zmerať frekvenciu každých 22 centimetrov.

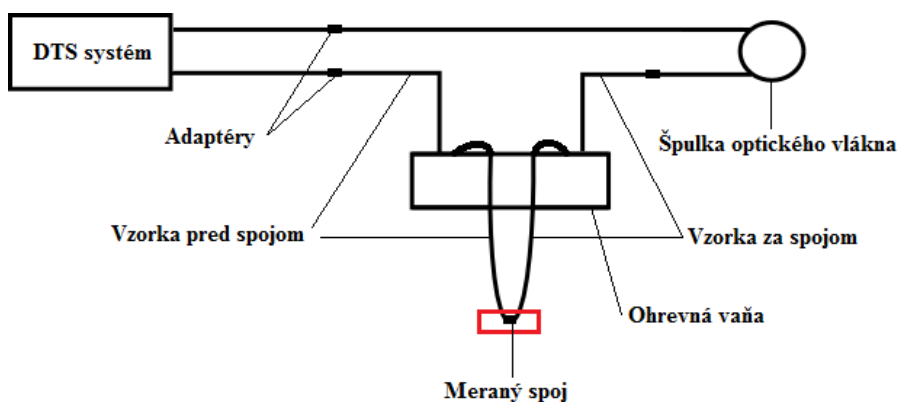


Obrázok 7.1: Prípravok so spojkou Fibrlok

7.2 Schéma zapojenia

Schéma znázorňuje prepojenie DTS systému so skúmaným prípravkom za pomoci prepojovacích patchcordov s konektormi E2000 a kotúčom optického vlákna zapojeným za prípravkom.

Meraná trasa vedie z DTS systému prepojovacím káblom cez redukčný adaptér, ktorý spája prvú vzorku skúmaného optického vlákna. Tá je následne prepojená s druhou vzorkou pomocou meraného konkrétneho spoja. Na koniec druhej vzorky je napojený kotúč optickej trasy s veľkosťou približne 1100 m, pretože DTS systém „vidí“ len na prvú polovicu meranej trasy. Rolka s optickou trasou je prepojená následne do vstupu DTS systému ďalším prepojovacím káblom.



Obrázok 7.2: Schéma zapojenia

7.3 Pracovisko

Na obrázku je vidieť pracovisko s DTS systémom, ohrevnú vaňu, kotúč s optickým vláknom, digitálny teplomer a zväračku optických vlákien.

Zo systému DTS vystupuje prepojovací kábel prepájajúci skúmaný prípravok, za ktorým je zapojený kotúč s optickým vláknom, ktorý ukončuje celé zapojenie spojením vstupného patchcordu so vstupom DTS systému.

Vzorky optického vlákna pri meraní boli ponorené do ohrevnej vane, pričom spoj, ktorý bol meraný sa vždy nachádzal mimo vaňu. A to z niekoľkých dôvodov. V prvom rade to poskytovalo prehľadné vykreslenie Brillouinovej frekvencie pomocou DTS systému, kde sa dal rozoznať odskok (spoj) medzi vzorkami a druhým dôvodom bola konštrukcia spojov, ktoré neboli prispôbené pre prostredie vo vode.

Spomínaný zobrazovaný výkyv sme dosahovali zahriatím vody na 70 °C. Počas merania bol niekoľko krát časovo náročný proces udržiavať teplotu na stálych 70 °C, pretože voda sa stihala vzduchom ochladzovať a zároveň išlo o väčšie množstvo vody, ktoré pri zahrievaní alebo ochladzovaní malo pomalú odozvu na teplomeri ohrevnej vane. Tento problém sme vyriešili extérmym digitálnym teplomerom, podľa ktorého sme určovali presnú teplotu vody vo vani.



Obrázok 7.3: Pracovisko s DTS systémom

7.4 Výber spojok a vlákna

DTS systémy pracujúce s Brillouinovou frekvenciou merajú len na SM vláknach, takže výber vlákna bol vopred jednoznačne určený.

Čo sa týka výberu optických spojov, dali sme prednosť „starším“ optickým konektorom SC/PC a SC/APC, ktoré sú v praxi najpoužívanejšie pre svoje vlastnosti rýchleho konektorovania a spájania. Poznať preto vplyv týchto konektorov by bol užitočným parametrom.

Optický zvar je využívaný pri SM vláknach pre veľmi dlhé trasy. V praxi začína byť DTS systém využívaný pre meranie mechanických namáhání pozdĺž optického vlákna práve pomocou DTS systému.

Mechanická spojka Fibrlok je zas najviac využívaná z pomedzi rýchlospojok, má vynikajúce útlmové vlastnosti a v priemysle nabera dominantné postavenie kvôli svojej nenáročnosti a rýchlosti spájania.

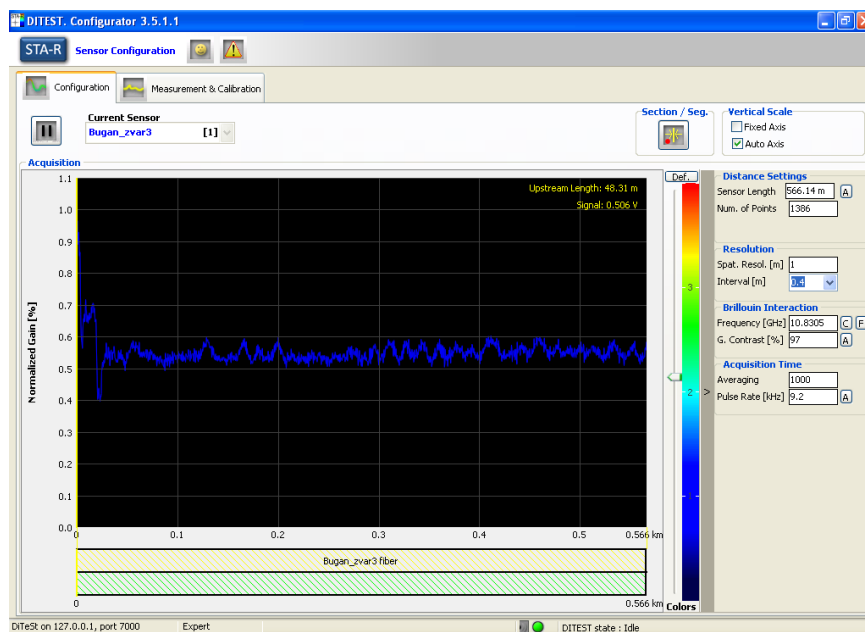
Optický konektor E2000 patrí svojou kvalitou, veľkosťou vložného útlu a útlmu odrazu medzi top konektory, takže poznanie veľkosti vplyvu tohto spoja sa môže stať takmer referenčným pre ostatné spoje.

7.5 Kalibrácia

DTS systém DITEST STA-R od firmy Omnisens ako jediný umožňuje užívateľovi zvoliť si spoľahlivú auto-konfiguráciu, ktorá v praxi šetrí čas a zamedzuje možnosť chyby ľudského faktoru nesprávnou konfiguráciou.

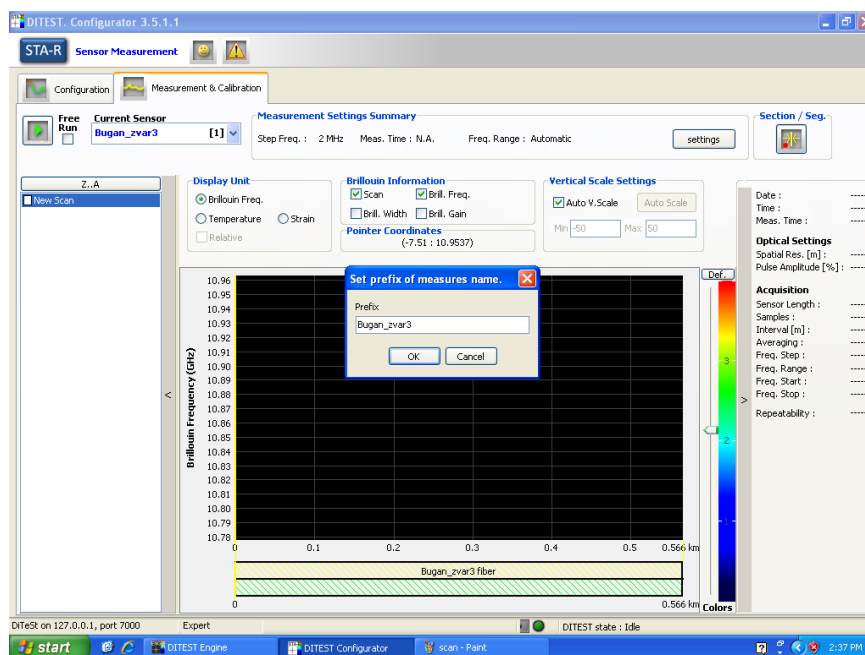
Auto-konfigurácia prevedie užívateľa niekoľkými jednoduchými krokmi, počas ktorých ho nezaťažuje kalibračnými otázkami ako iné systémy, ale sama vyhodnotí vlastnosti meranej optickej trasy.

V prvom rade je nutné priradiť senzor ku kanálu, aby systém vedel, kde priradiť nameranú analýzu optickej trasy. DTS systém má totiž 2 kanály. Senzorom sa chápu nastavenia pre dané meranie. Auto-konfigurácia počas priradenia senzora ku kanálu vykoná meranie, ktoré vyhodnotí celkovú dĺžku trasy, level útlu a navrhne najlepšie meracie parametre pre senzor ako napríklad interval snímaných bodov, spriemerovanie, priestorové rozlíšenie.



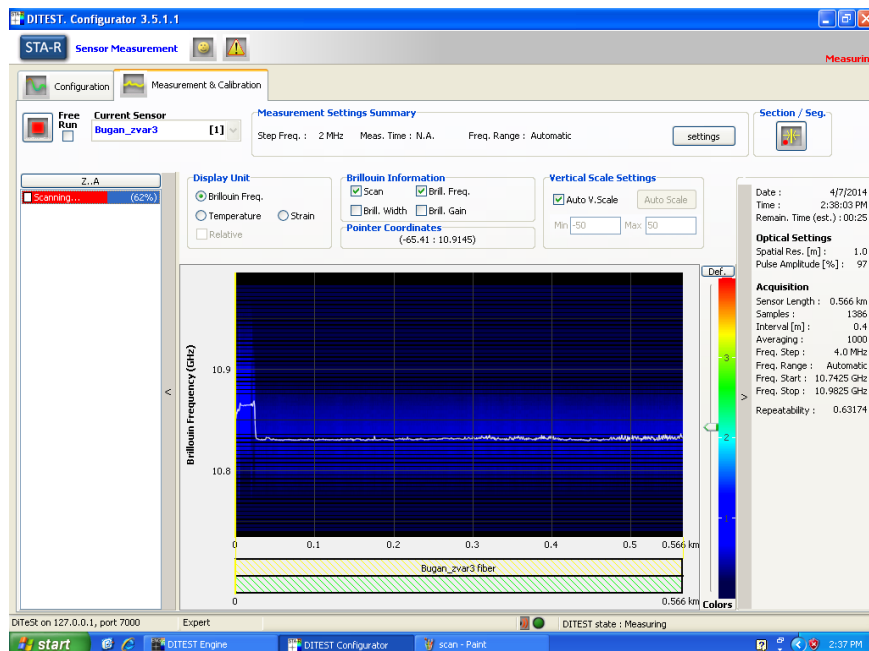
Obrázok 7.4: Prvá fáza auto-konfigurácie, určenie ideálnych parametrov

Systém pred reálnym meraním optickej trasy vyzve užívateľa k pomenovaniu senzoru nadstavením prefixu merania, aby bolo ľahšie na konci rozlíšiť jednotlivé časti merania. Pomenovanie senzora prefixom zobrazuje obrázok č. 7.5.



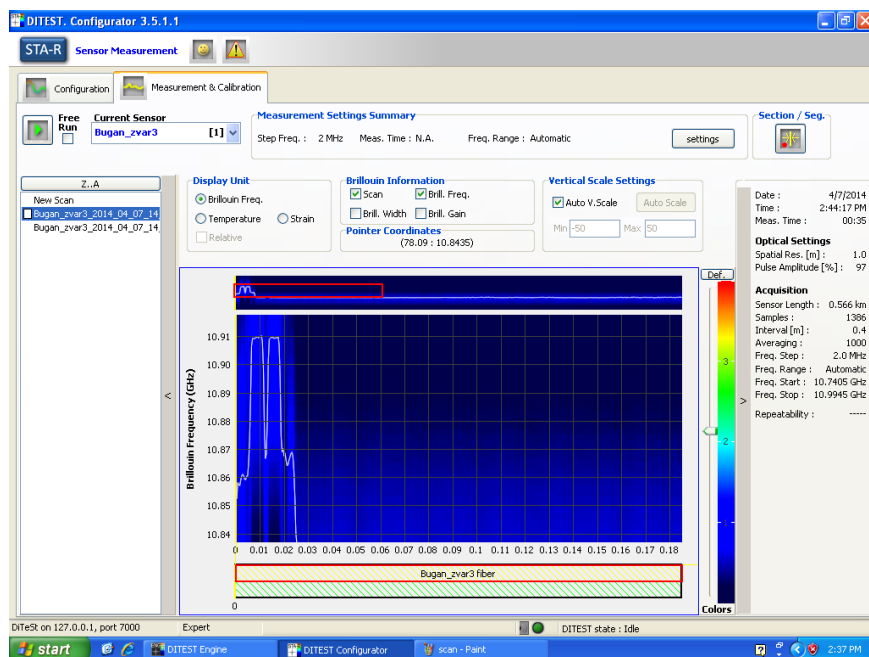
Obrázok 7.5: Pomenovanie senzora merania prefixom

Po pridelení senzora ku kanálu sa spustí v karte *Measurement & Calibration* operácia *Free Run*, ktorá začne skenovať meranú optickú trasu. Operácia sa vykonáva opakovateľne, je nutné ju zastaviť. Proces trvá približne jednu minútu a je zobrazený na obr. č. 7.6.



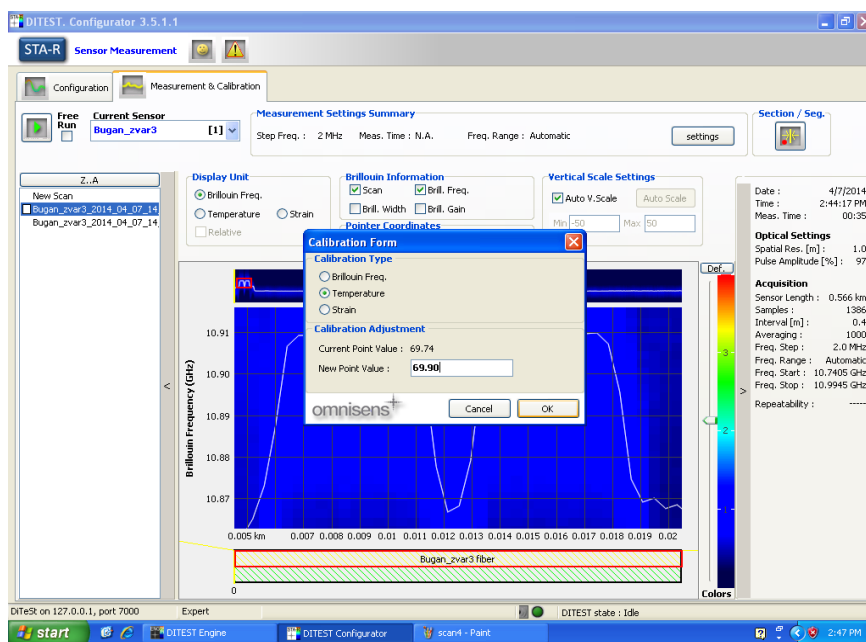
Obrázok 7.6: Priebeh skenovania optickej trasy

Po doskenovaní optickej trasy systém zobrazí graf udávajúci veľkosť Brillouinovej frekvencie pre určitú vzdialenosť. Obrázok č. 7.7 popisuje tento stav, kde je možné očividne pozorovať vrcholy predstavujúce vzorky vlákien ponorené vo vode. Medzi dvoma vrcholmi je optický spoj.



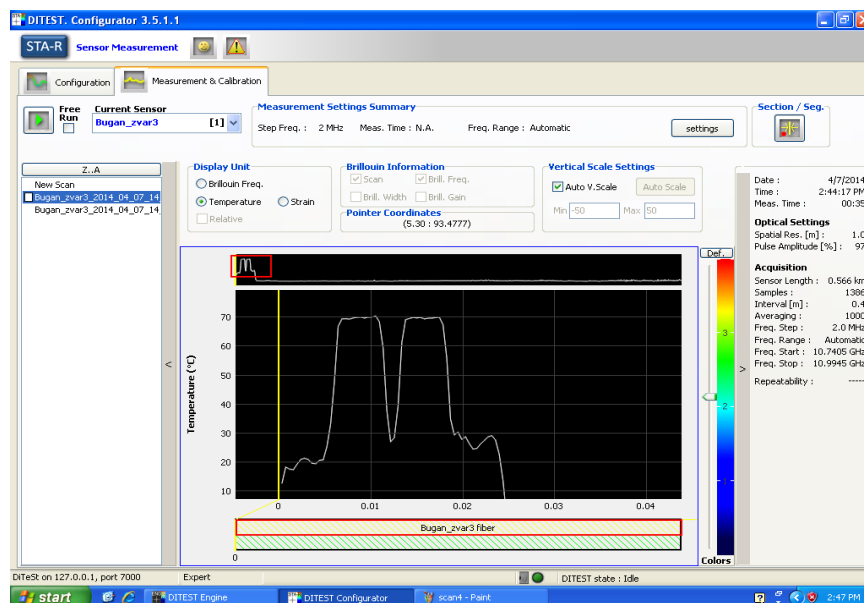
Obrázok 7.7: Výsledok skenovania optickej trasy

Na základe nameranej Brillouinovej frekvencie v optickej trase sa kalibruje teplota. V grafe na miestach zobrazujúcich vrcholy predstavujúce ponorenú optickú trasu vzorky sa nastavuje kalibračný bod. Kalibračný bod sa volí približne v hodnote, ktorá predstavuje najväčšiu časť hodnoty Brillouinovej frekvencie v dĺžke trasy zobrazujúcej vrchol, teda vzorky ponorené vo vode. Podľa referenčného teplomera sa pre daný zvolený kalibračný bod nastaví teplota a systém DTS dopočíta teplotu pre celú optickú trasu. Zadávanie kalibračnej teploty ilustruje obrázok č. 7.8.



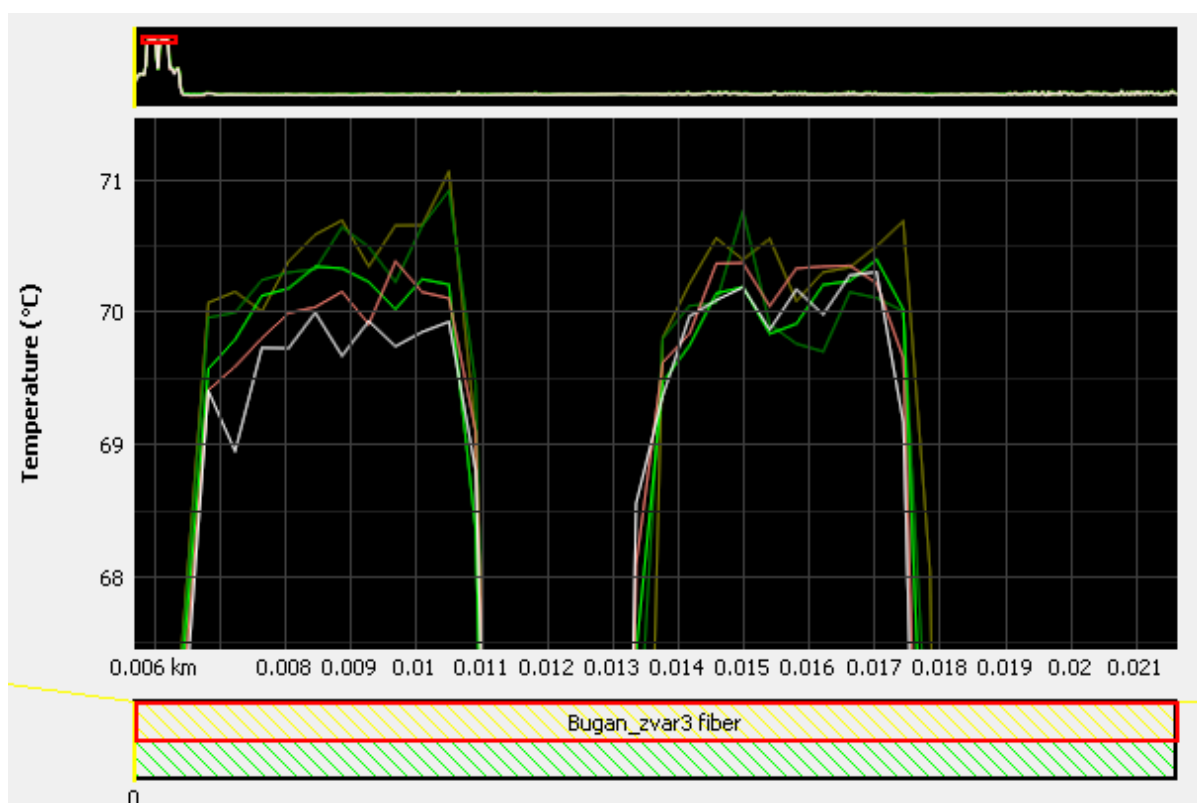
Obrázok 7.8: Kalibrácia teploty v závislosti na Brillouinovej frekvencii

Na obrázku č. 7.9 je vidieť prepočítanú teplotu z Brillouinovej frekvencie, ktorá sa pohybovala okolo 70 °C. Čo sa týka výsledku, podstatné nebolo udržiavať teplotu na prísnych 70 °C, ale pozorovať výchylku frekvencií (teplôt) medzi nameranými hodnotami v miestach pred a po spoji.



Obrázok 7.9: Prepočítaná Brillouinová frekvencia na teplotu

DTS systém umožňuje vzájomne zobraziť viacero meraní do jedného grafu. Na ukážku v tomto prípade je na obrázku č. 7.10 zobrazené porovnanie všetkých prepočítaných teplôt optického zvaru.



Obrázok 7.10: Porovnanie teplôt pri spojkke zvar

7.6 Meranie spojov

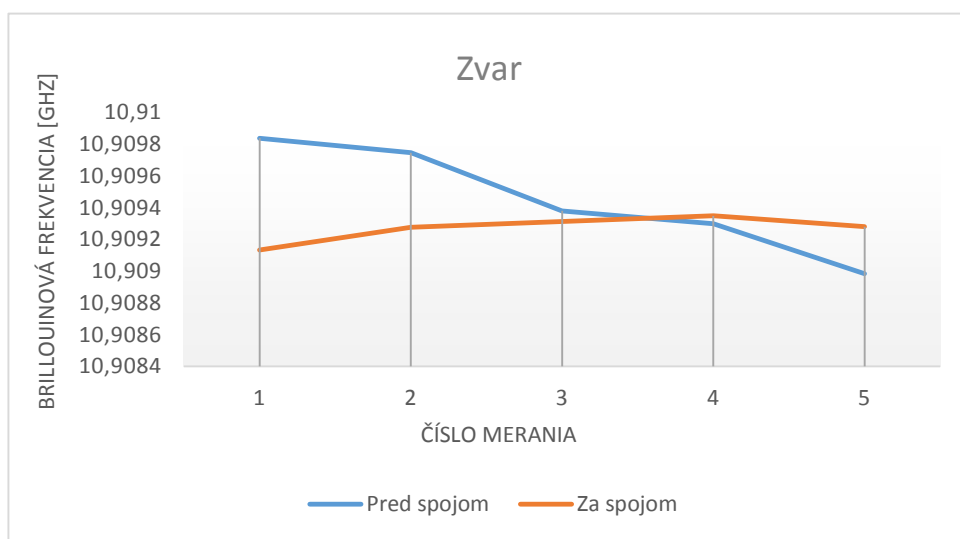
Meranie bolo časovo veľmi náročné. Dávali sme veľký pozor na správne spájanie, čistotu konektorov, vlákien a precíznosť celého procesu spájania každého spoja.

Pre každé meranie jednotlivých spojov sa spriemerovalo 5 hodnôt predstavujúcich najväčšiu časť vrcholu v grafe zobrazujúcom ponorenú vzorku optického vlákna. Tento priemer oboch vrcholov je možné vidieť v grafe na obrázku č. 7.16 porovnávajúcim všetky merané spoje navzájom a odskok frekvencií ich vrcholov.

7.6.1 Zvar

Spájanie vzoriek prostredníctvom tavného zvarovania bolo celkovo časovo najnáročnejšie. Po zmeraní frekvencie sme zvar roztrhli, vlákna znova zalomili, očistili, zvarili a natavili ochranu na zvar.

Ochrana zvaru čerstvo po jej natavení bola ešte horúca, preto sme počkali pár minút kým vychladne, aby náhodou neovplyvnila kvalitu merania. Hodnotu priemernej Brillouinovej frekvencie v jednotlivých fázach merania popisuje obrázok č. 7.11.

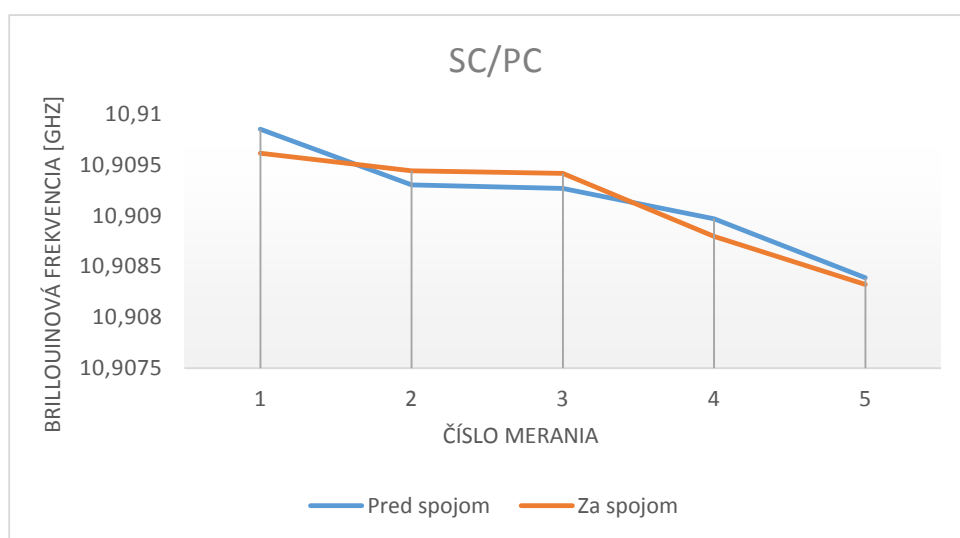


Obrázok 7.11: Porovnanie teplôt pri spojkke zvar

7.6.2 PC

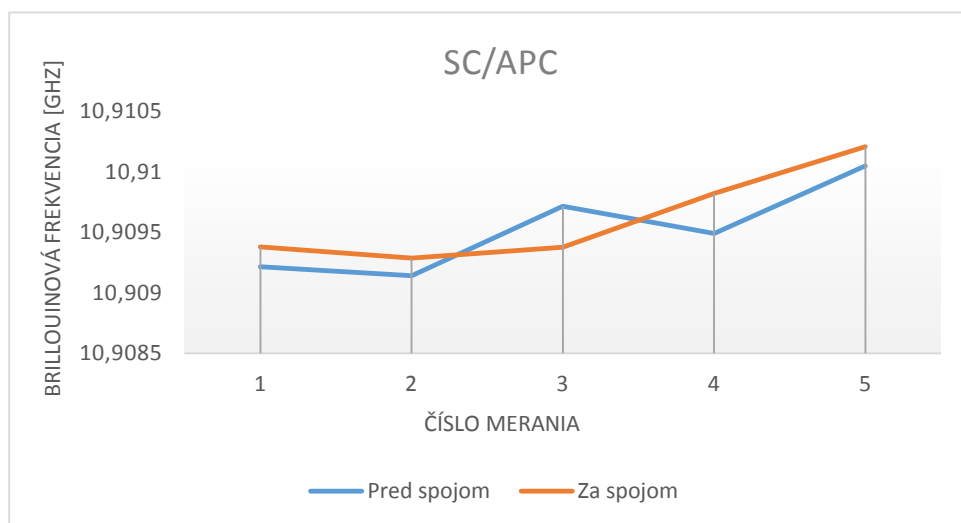
Meranie vplyvu PC a APC konektorov na Brillouinovú frekvenciu sme vykonávali rozpojením konektorov z adaptéru, očistením ich ferrúl a znovu zapojením konektorov do adaptéru.

Je vidieť nevýrazné odchýlky frekvencie po spoji v porovnaní s frekvenciou pred spojom, takže konektory sa dajú považovať ako za nevplyvajúce na meranie. Zaujímavé sú výsledky PC konektora na obrázku č. 7.12, od ktorého sme neočakávali lepšie hodnoty než od APC konektora popisujúci grafom na obrázku č. 7.13.



Obrázok 7.12: Graf zobrazujúci priemernú Brillouinovú frekvenciu pred a po optickom konektorovom SC/PC spoji

7.6.3 APC



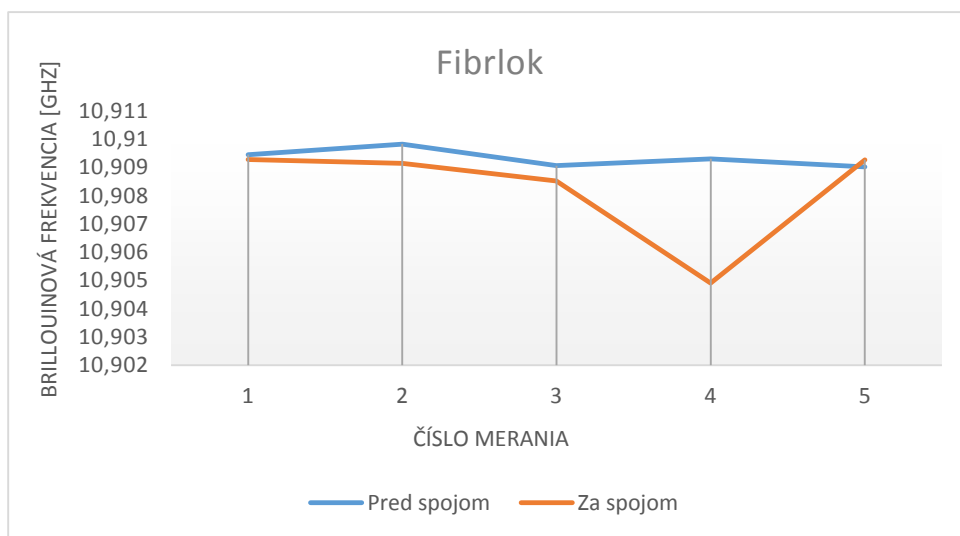
Obrázok 7.13: Graf zobrazujúci priemernú Brillouinovu frekvenciu pred a po optickom konektorovom spoji SC/APC

7.6.4 Fibrlok

Meranie vplyvu Fibrlok spojky prebiehalo rovnako, zalomením vlákien, očistením, zavedením vlákien do spojky a zacvaknutím krytu spojky.

Na Fibrlok spojke bolo poznať, že každé rozobratie ju robí labilnejšiu, čo sa prejavilo na štvrtom meraní, kedy sme spojku vymenili, pretože sa poškodila vnútorná V-drážka a poškodzovala nám vlákno. Piate meranie prebehlo už v poriadku.

Na obrázku č.7.14 je jasne poznať výkyv Brillouinovej frekvencie za spojom, z dôvodu neoptimálneho spojenia vlákien.

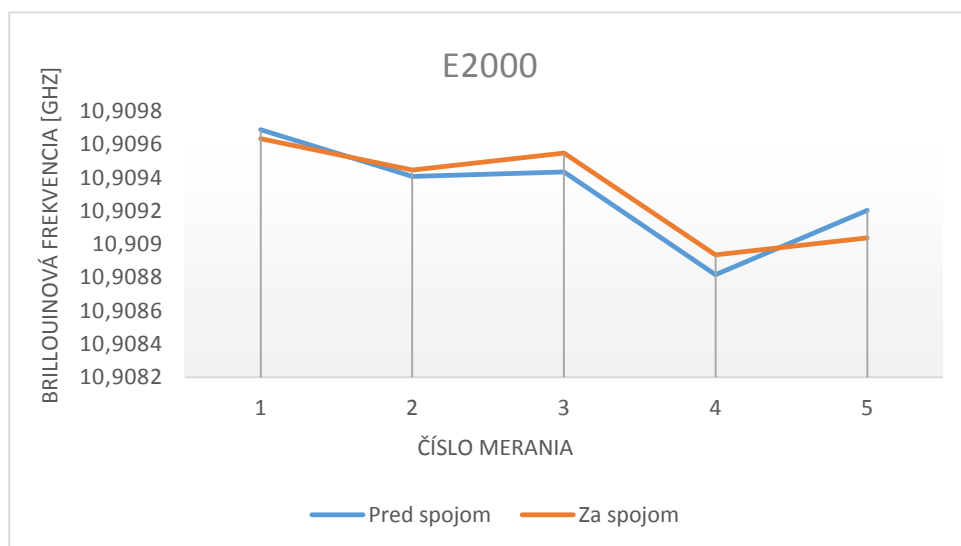


Obrázok 7.14: Graf zobrazujúci priemernú Brillouinovú frekvenciu pred a po optickej spojke Fibrlok

7.6.5 E2000

Pri meraní E2000 konektorov je očividné na obrázku č.7.15, že konektor si drží ideálne vlastnosti pre spájanie optických vlákien a potvrdzuje, že je favorit medzi konektormi.

Spájanie prebiehalo perfektne, konektor pôsobil mechanicky pevne a javil minimálne odchýlky na vzorkách vlákien.



Obrázok 7.15: Graf zobrazujúci priemernú Brillouinovu frekvenciu pred a po optickom konektorovom spoji E2000

7.7 Zhodnotenie

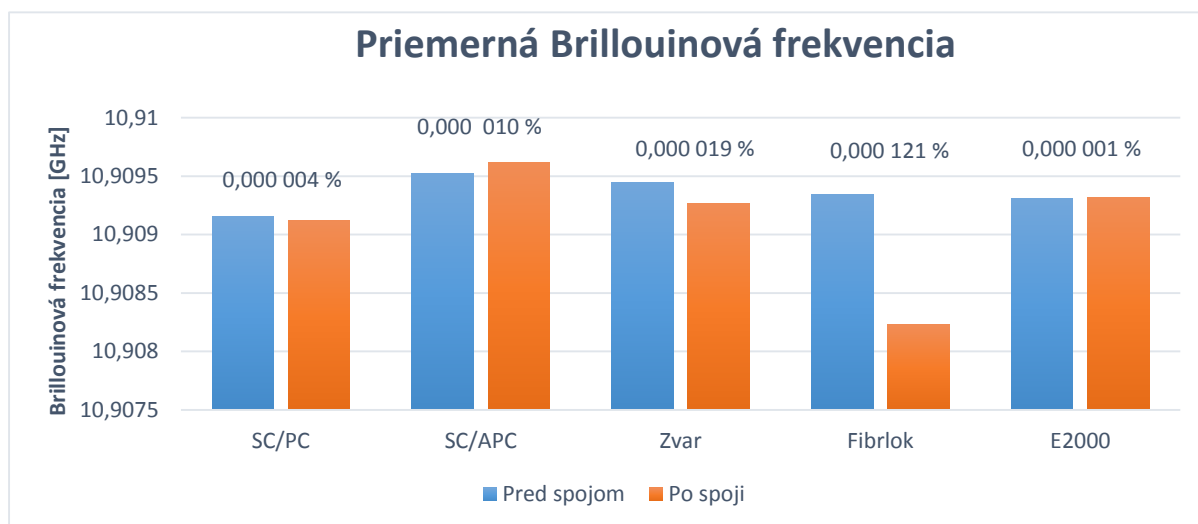
V percentuálnom vyjadrení je na obrázku č. 7.16 možné vidieť rozdiel spriemerovaných hodnôt Brillouinovej frekvencie pred spojom a za spojom. Hodnoty Brillouinovej frekvencie záviseli od momentálnej teploty vody, ktorá kolísala v rozmedzí $\pm 0,5$ °C. Na základe týchto hodnôt bola dopočítaná teplota.

Očakávaný výsledok sa naplnil a najlepšie na tom bola spojka DIAMOND E2000, ktorá mala podľa merania najmenší vplyv na meranie. Výkyv vplyvu spojky na meranie sa pohyboval na 0,000 001 %.

Naopak najhoršie na bola mechanická gelová spojka Fibrlok, ktorej výchylka sa rovnala hodnote 0,000 121 %. Spojka Fibrlok sa zaraďuje medzi nerozoberateľné ale aj v potrebných prípadoch medzi rozoberateľné mechanické spojky. Problém však spočíva v tom, že pri rozobraní tejto spojky sa znižuje jej kvalita a ďalší spoj vykazuje menej spoľahlivé vlastnosti, čo sa prejavilo aj na tomto meraní. Spojka Fibrlok sa javila dôveryhodne, avšak vzhľadom na to, že nie vždy sa optické vlákno spojí úplne optimálne, je tu väčšia požiadavka na jej premeranie. V našom meraní optická spojka sa javí ako najviac

vplývajúcejšia na meranie optických vlákien pomocou DTS systému. V prípade kvalitného spojenia má spojka ideálne vlastnosti.

Pre pozorovateľa je vyjadrenie v teplote zrozumiteľnejšie a vyjadrenie Brillouinovej frekvencie sa vzťahuje na zadanie práce, teda meranie vplyvu spojov na Brillouinovú frekvenciu. Teplotný graf je súčasťou prílohy.



Obrázok 7.16: Graf percentuálneho vyjadrenia rozdielu priemerných Brillouinových frekvencií jednotlivých spojov pred a po spoji.

8 Záver

V tejto bakalárskej práci som sa zaoberal problematikou vplyvu rôznych optických spojov na meranie pomocou DTS systému. Mojou úlohou bolo zistiť, či pri meraní pomocou DTS systému nastáva skreslenie Brillouinovej frekvencie po prechode optického signálu konkrétnym spojom.

Teoretická časť práce sa venuje úvodu do princípov fungovania DTS systému, vysvetľuje základné rozptyly vznikajúce v optickom vlákne, popisuje techniky spájania optických vlákien, približuje spojky použité v meraní a nástroje pre ich spájanie. Cieľom je uvedenie do tém potrebných pre pochopenie podstaty, ktorú je nevyhnutné poznať pre praktickú časť merania práce.

Priebeh celého merania je zdokumentovaný v praktickej časti vo vypracovaní. Testované spojky boli vybraté na základe rozšírenosti v priemysle a pre svoje výnimočné vlastnosti pre prenos optického signálu.

Zo spracovaných výsledkov môžem usúdiť, že optické spojky nemajú značný vplyv pre meranie pomocou DTS systému. Výsledky ukazujú na mierne výkyvy spôsobené optickými spojmami, ale pre prax sú tieto rozdiely takmer zanedbateľné.

Ak by som mal zhodnotiť vplyv spojok z pohľadu laboratórnych výsledkov, spojky dokonale reprezentujú svoje postavenie v priemysle. Najpoužívanejšie spojky ako optický zvar spolu s konektormi SC/PC mali medzi sebou skoro totožné výsledky vplyvu na meranie Brillouinovej frekvencie. Optická spojka Fibrlok kvôli svojej vlastnosti nie vždy ideálne prepojených vlákien, javila z pomedzi všetkých spojok najväčší vplyv na meranie. Dominanciu medzi konektormi, vďaka svojím jedinečným konštrukčným a prenosovým vlastnostiam potvrdzujú konektory od firmy DIAMOND®, radovo označené E2000, ktoré mali na meranie pomocou DTS systému najmenší vplyv. Hneď po nich vykazujú najmenší vplyv optické konektory SC/APC.

Ďalšie zaujímavé výsledky merania by mohlo byť dosiahnuté niekoľkými sériovo za sebou vykonanými spojmami, čo by mohlo vyvrátiť záver, že optické spoje nemajú značný vplyv na meranie pomocou DTS systému.

Literatura

- [1] DADO, M., TUREK, I., ŠTELINA, J., BITTERE, L., TUREK, S., GROLMUS, E., STIBOR, P.: Kapitoly z optiky pre technikov, Žilinská univerzita, Žilina, 1998. ISBN 80-7100-390-5.
- [2] Rayleigh scattering. 2014. *Encyclopædia Britannica Online*. Retrieved 01 máj, 2014, from <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/492483/Rayleigh-scattering>
- [3] SALEH, Bahaa E. *Fundamentals of photonics*. New York: John Wiley, 1991, xviii, 966 s. ISBN 04-718-3965-5.
- [4] OMNISSENS SA. *User Manual DITEST STA-R: UM-018a* [online]. 2008 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: www.omnisens.com
- [5] FOS&S :: Stimulated Brillouin Scattering Technology :: Oil platforms :: ROV cables :: SBS Solution [online]. 2008 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://foss.browsbox.be/index/be-en/1113/>
- [6] BALL, D.W., *Theory of Raman Spectroscopy* [online]. 2001 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z <http://www.spectroscopynow.com/coi/cda/list.cda?catId=2606&type=Link&sort=az&chId=6>.
- [7] SENSORTRAN A HALLIBURTON COMPANY. *SensorTran, Distributed Temperature Sensing (DTS), Fiber Optic Sensing - DTS Basics* [online]. 2011 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: http://www.sensortran.com/technology_dtsbasics.php
- [8] LONG, D. A. .: *The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules*, 2002, 650 p., ISBN: 978-0-471-49028-9.
- [9] ITU-T: G.651: *Characteristics of a 50/125 mm multimode graded index optical fibre cable* [online]. 1998, [cit. 2014-04-22]. Dostupné z [www: http://202.114.9.3/xueke/wldz/bz/g/2.pdf](http://202.114.9.3/xueke/wldz/bz/g/2.pdf)
- [10] LÁTAL, J., P. KOUDELKA, F. HANÁČEK a P. ŠIŠKA. *Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty* [online]. 2010 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2010030001>
- [11] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [12] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 8071003905

- [13] TIHLAŘÍK, T. *Vliv kvality mechanických prací na optický přenos*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 82 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [14] *Alternetivo - UTM síťová bezpečnost, switching & routing, monitoring, kabeláže a vše pro optické sítě* [online]. 1996 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.alternetivo.cz>
- [15] *Fiber Optic Connector Comparison - Powered by Kayako Help Desk Software* [online]. 2008 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://bnc.kayako.com/Knowledgebase/Article/View/349/0/fiber-optic-connector-comparison>
- [16] TATARKO, Matúš. *Spájanie optických vlákien* [online]. 2013 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=15602>
- [17] *FIBRLOK mechanická spojka optických vlákien - TELEFON s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://www.telefonsro.sk/sk/new/index.php?clanek=5>
- [18] DORMAN, Patricia Dorman. *COMPI-2.QXD*. 1999, 4 s. Dostupné z: http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/FPC-PMJUMPER-002_pdf5.pdf
- [19] *I8+I8_otoc_naradi_svareni_opt_vlaken.indd*. 2012. Dostupné z: www.rlc.cz/downloads/naradi_pro_svareni_optickych_vlaken.pdf
- [20] *Lámačka optických vláken Fujikura CT-10A-FC - pro 1 vlákno, vč. Fiber plate AD-10* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.ipmedia.cz/?cls=stoitem&stiid=1862>
- [21] *Isopropylalkohol 1000ml další názvy produktu: IPA, propan-2-ol, isopropanol (8594037830584) | AB-com.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://www.ab-com.cz/isopropylalkohol-1000ml-dalsi-nazvy-produktu-ipa-propan-2-ol-isopropanol-8594037830584-_d197117.html
- [22] JASENSKÁ, Iveta. *Untitled Prezi by iveta.jasenska on Prezi* [online]. 2013 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://prezi.com/-if0a-4r18vx/untitled-prezi/>
- [23] SUMITOMO ELECTRIC EUROPE LTD. *Microsoft Word - T-71C brochure TZA039DO0002-01*. 2013. Dostupné z: <https://www.google.sk/url?q=http://www.flextor.sk/downloads/Zvaracka%2520Sumitomo%2520T-71C%2520.pdf&sa=U&ei=VwhZU5qvFNKv7AbJnoCYAw&ved=0CDQQFjAC&sig2=gNzpjGXkI3mnrC4PMXsISw&usg=AFQjCNEG3patsaVY4DmQVIJzwBHi-VAWUw>
- [24] SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, Ltd. *Direct core monitoring fusion splicer TYPE-71C / Optical Network Solution / Sumitomo Electric Industries, Ltd.* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: http://global-sei.com/fttx/product_e/fusionsplacers/emea/n_e_fs-71c.html

- [25] IPMEDIA S.R.O. *Optické pasivní prvky / Optické kazety+ochrany svárů* [online]. 2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.ipmedia.cz/default.asp?cls=sresenttrees&strid=139>
- [26] K9 S.R.O. *3M konektorovacia sada Fibrlok* [online]. 2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.talkive.sk/produkty/3m-konektorovacia-sada-fibrlok.166093.html>
- [27] KINSTETR, Lukáš. TELCO TECHNOLOGIES S.R.O. *Katalog Telco bez zapati a strankovani: Fibrlok 2540*. 2010. Dostupné z: https://www.google.sk/url?q=http://www.telcotechnologies.cz/download%3Fid%3D339&sa=U&ei=xVIZU_aHFKmw7Ab36IGACg&ved=0CCIQFjAA&sig2=o3SS_3nQ0Dyhd-tQhdIInw&usg=AFQjCNEMCivCIdDW5GkkZy3viGpp-HfCEQ

Zoznam príloh

Príloha A: Grafy zobrazujúce priemernú teplotu pred a po konkrétnom optickom spoji.....	lii
Zvar.....	liii
SC/PC.....	liii
SC/APC.....	liv
Fibrlok.....	liv
E2000.....	lv
Príloha B: Graf percentuálneho vyjadrenia rozdielu priemerných teplôt jednotlivých spojov pred a po spoji.....	lv
Príloha C: Tabuľky spriemerovaných hodnôt pre Brillouinovú frekvenciu a teplotu spojov..	lvi
Zvar.....	lvi
SC/PC.....	lvi
SC/APC.....	lvii
Fibrlok.....	lvii
E2000.....	lviii

Súčasťou BP je CD.

Adresárová štruktúra priloženého CD:

\Vsetky_hodnoty

 \APC

 \E2000

 \exports

 \Fibrlok

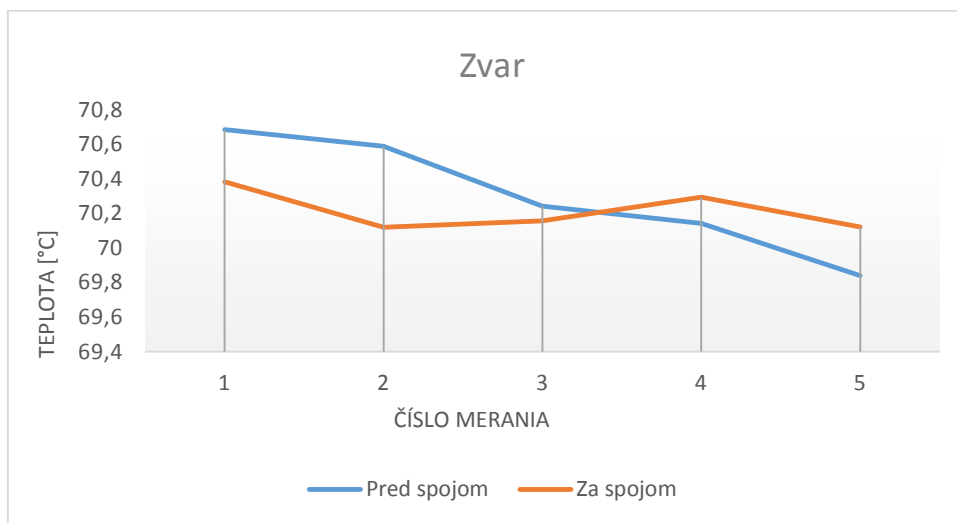
 \UPC

 \Zvar

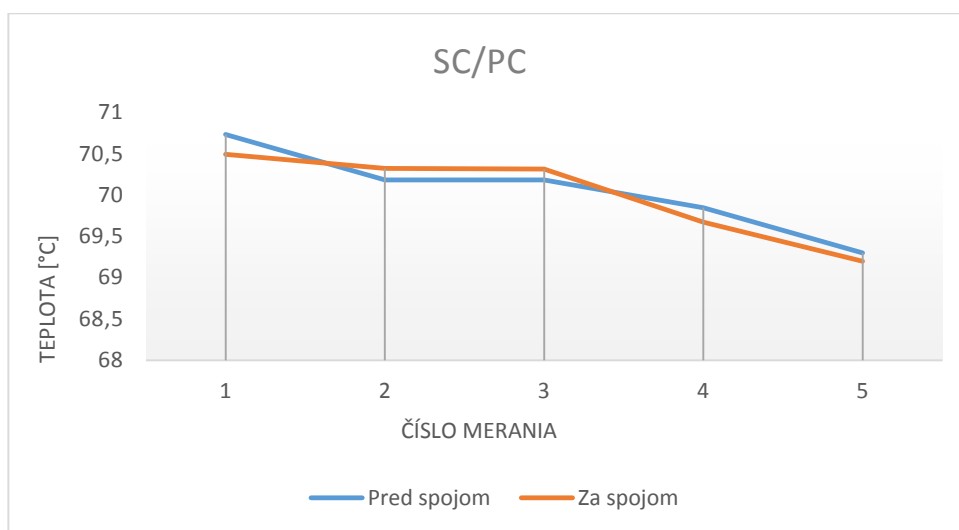
\Spracovane_hodnoty.xlsx

Príloha A: Grafy zobrazujúce priemernú teplotu pred a po konkrétnom optickom spoji.

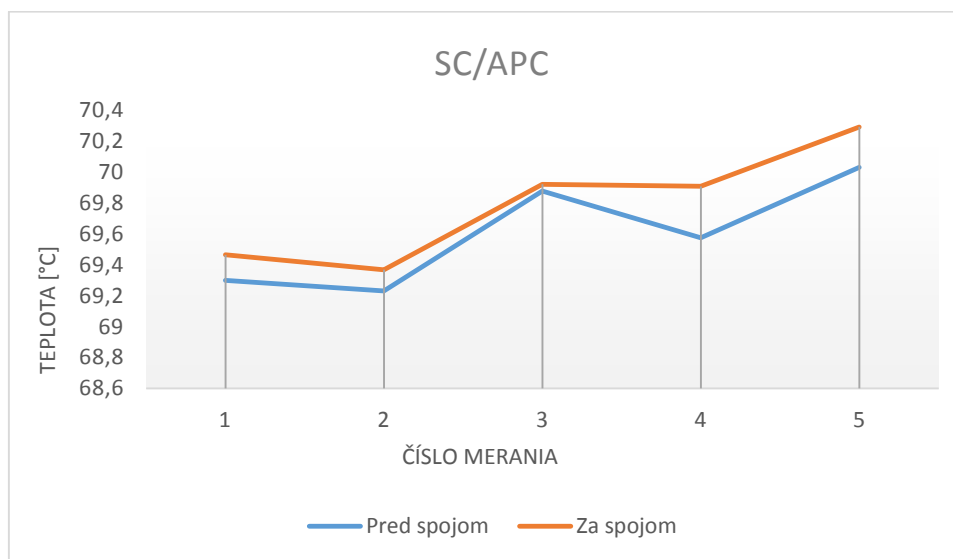
Zvar



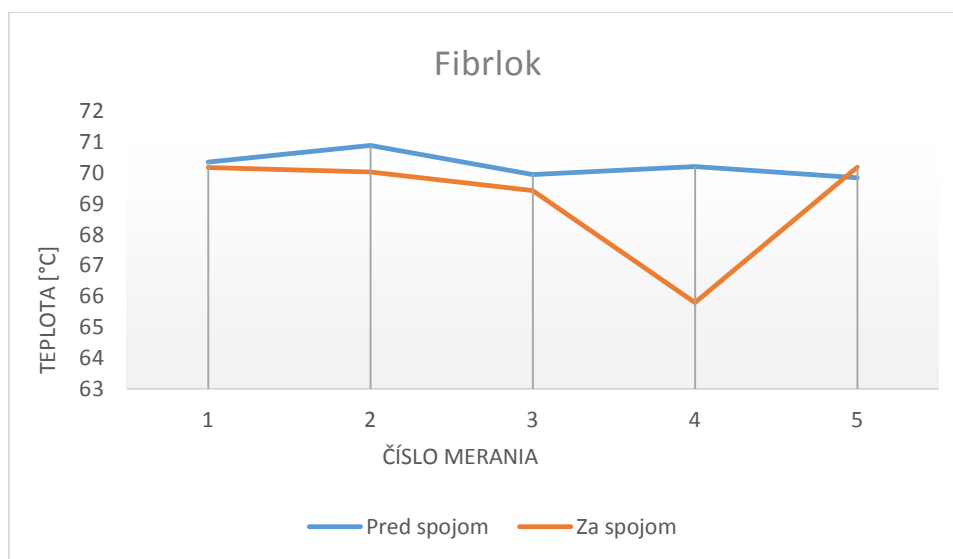
SC/PC



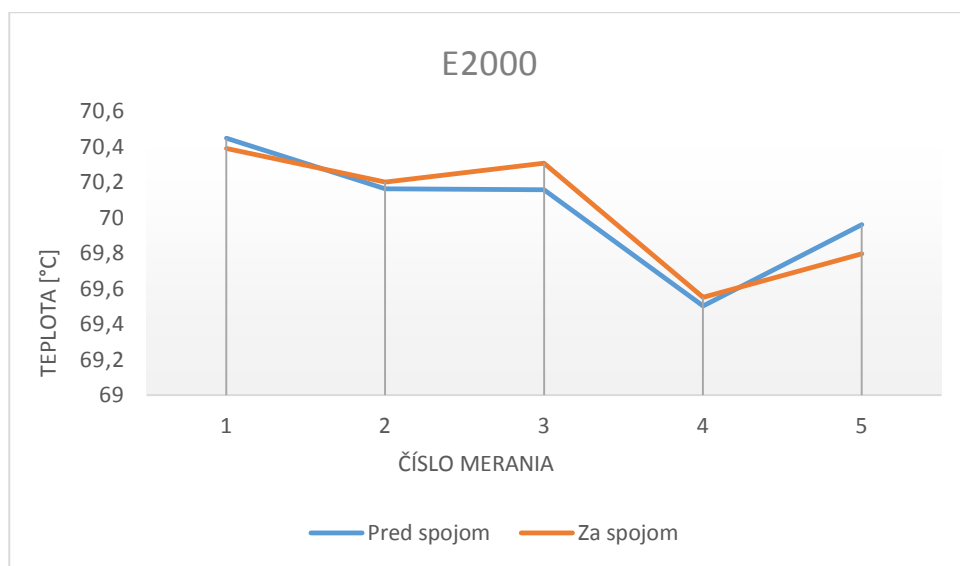
SC/APC



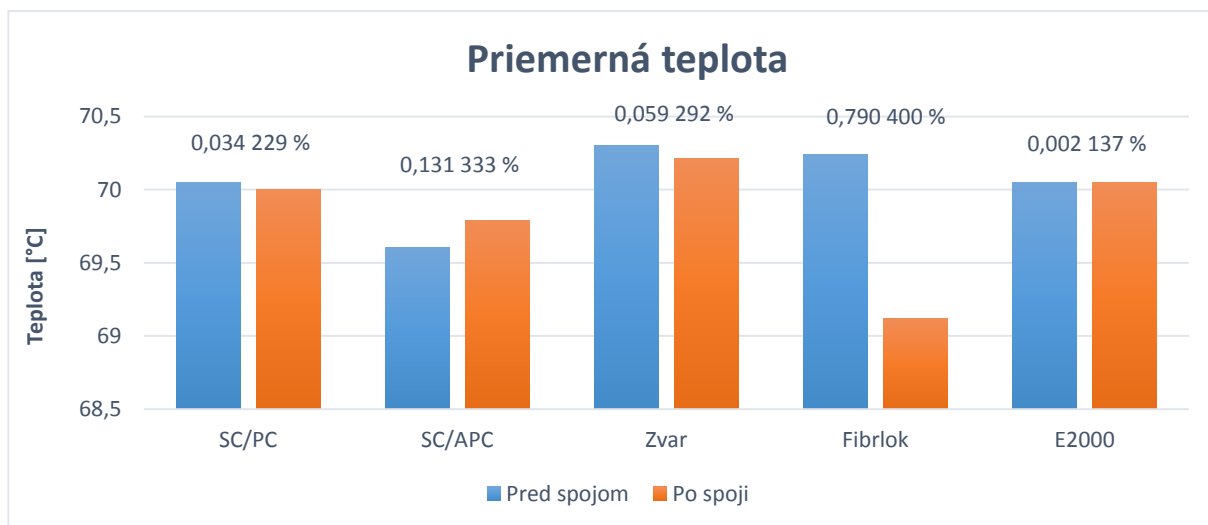
Fibrlok



E2000



Príloha B : Graf percentuálneho vyjadrenia rozdielu priemerných teplôt jednotlivých spojok pred a po spoji.



Príloha. C : Tabuľka vyjadrujúca priemer spriemerovaných hodnôt pred spojom a po spoji spojky zvar.

Zvar

Zvar		Číslo merania	0	1	2	3	4	5	Priemer
	Brillouinová frekvencia [GHz]	Pred spojom (1)	10,86504	10,90984	10,90975	10,90938	10,9093	10,90898	10,90945
		Po spoji (2)	10,86726	10,90913	10,90928	10,90931	10,90935	10,90928	10,90927
	Teplota [°C]	Pred spojom (1)	25,84384	70,68466	70,58852	70,24291	70,1424	69,83951	70,2996
		Po spoji (2)	25,55602	70,38387	70,11951	70,15632	70,29384	70,12275	70,21526

SC/PC

SC/PC		Číslo merania	0	1	2	3	4	5	Priemer
	Brillouinová frekvencia [GHz]	Pred spojom (1)	10,90909	10,90985	10,9093	10,90927	10,90897	10,90839	10,90916
		Po spoji (2)	10,90897	10,90962	10,90944	10,90942	10,9088	10,90832	10,90912
	Teplota [°C]	Pred spojom (1)	70,03561	70,72989	70,18057	70,18248	69,84488	69,29613	70,04679
		Po spoji (2)	69,84621	70,49204	70,31866	70,31122	69,67016	69,19752	69,99792

SC/APC

SC/APC		Číslo merania	0	1	2	3	4	5	Priemer
	Brillouinová frekvencia[GHz]	Pred spojom (1)	10,85998	10,90922	10,90914	10,90972	10,90949	10,91005	10,90952
		Po spoji (2)	10,85921	10,90938	10,90929	10,90938	10,90982	10,91021	10,90961
	Teplota [°C]	Pred spojom (1)	20,31615	69,29973	69,23202	69,87899	69,57629	70,03158	69,60372
		Po spoji (2)	19,47215	69,46548	69,36878	69,92248	69,90893	70,29384	69,7919

Fibrlok

Fibrlok		Číslo merania	0	1	2	3	4	5	Priemer
	Brillouinová frekvencia[GHz]	Pred spojom (1)	10,86402	10,90946	10,90984	10,90907	10,90931	10,90902	10,90934
		Po spoji (2)	10,86413	10,90928	10,90916	10,90853	10,90491	10,90928	10,90823
	Teplota [°C]	Pred spojom (1)	24,90736	70,35242	70,88247	69,94368	70,20384	69,8382	70,24412
		Po spoji (2)	25,00368	70,17256	70,02169	69,42221	65,79768	70,18038	69,1189

E2000

E2000		Číslo merania	0	1	2	3	4	5	Priemer
	Brillouinová frekvencia[GHz]	Pred spojom (1)	10,86322	10,90969	10,90941	10,90943	10,90882	10,9092	10,90931
		Po spoji (2)	10,86381	10,90963	10,90945	10,90955	10,90894	10,90904	10,90932
	Teplota [°C]	Pred spojom (1)	23,89361	70,44798	70,16379	70,15883	69,50289	69,96104	70,0469
		Po spoji (2)	24,76507	70,39019	70,20194	70,30817	69,55248	69,797	70,04996